И. Н. БОНДИН

БТК цеха 16

Контроль качества сварных соединений и конструкций

МАШГИЗ

БТК
Цеха 16

9

61 коп.

И. Н. Б

МАШГИЗ

ЛЕНИНГРАДСКОЕ ОТДЕЛЕНИЕ МАШГИЗА
Ленинград, ул. Дзержинского, 10

И. Н. БОНДИН

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И КОНСТРУКЦИЙ

МАШГИЗ

ГОСУДАРСТВЕННОЕ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

МОСКВА 1962 ЛЕНИНГРАД

В книге изложены современные методы контроля качества сварных соединений и конструкций; рассмотрены характерные пороки, встречающиеся в сварных соединениях, и причины их возникновения; дана классификация методов контроля и освещены вопросы его организации на производстве.

Книга рассчитана на инженерно-технических работников и может быть использована мастерами ОТК, бригадирами-сварщиками, студентами.

Рецензент инж. *И. В. Вологдин*
Редактор инж. *С. И. Думов*

Ленинградское отделение Машгиза
Редакция литературы по технологии машиностроения
Заведующий редакцией инж. *Е. П. Наумов*

ВВЕДЕНИЕ

С каждым годом все шире применяют сварку для изготовления всевозможных конструкций из различных металлов и сплавов. Все более высокие требования предъявляются к качеству этих конструкций, так как они работают в сложных условиях повышенных удельных нагрузок и скоростей, увеличенных давлений, резкого колебания температур.

Июльский Пленум ЦК КПСС 1960 г. обязал предприятия, совнархозы, министерства и ведомства расширить область применения экономичных сварных конструкций. В свете этих решений особое внимание должно быть уделено повышению качества изготовления сварных конструкций, имеющих огромное народнохозяйственное значение. Качество сварных конструкций (их прочность, долговечность и надежность в эксплуатации) в ряде случаев определяется сплошностью металла сварного соединения, его однородностью и отсутствием в нем пороков.

Важнейшими условиями повышения качества сварных конструкций являются прогрессивная технология, систематическое улучшение организации системы контроля качества, которая базируется на широком применении современных способов, обеспечивающих требуемую чувствительность и высокую производительность контроля.

Важное значение приобретают методы контроля сварных швов и соединений без их разрушения и без изготовления образцов для механических испытаний. К таким методам относятся: люминесцентный и цветной методы контроля, магнитная, ультразвуковая, рентгеновская и гамма-дефектоскопия сварных швов и соединений. Этим методам, как наиболее прогрессивным, уделено в книге наибольшее внимание.

Однако следует отметить, что среди всех методов контроля качества нет такого, который гарантировал бы выявление всех

пороков (особенно внутренних) сварного соединения. Каждый из методов обладает своими достоинствами и недостатками.

Практика показывает, что правильная организация контроля на всех этапах производственного процесса, а также умелое применение того или иного метода контроля, с учетом его особенностей, позволяют определить качество отдельных деталей и сделать обоснованное заключение о качестве любой сварной конструкции в целом.

Целью настоящей книги является оказание широкому кругу работников промышленности помощи в изучении современных методов контроля качества сварных соединений и конструкций с тем, чтобы обеспечить дальнейшее повышение их качества.

ГЛАВА I

ДОПУСТИМЫЕ И НЕДОПУСТИМЫЕ ПОРОКИ В СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЯХ И ПРИЧИНЫ, ИХ ВЫЗЫВАЮЩИЕ

По своему характеру пороки, встречающиеся в сварных швах и соединениях, подразделяются на внутренние — не обнаруживаемые внешним осмотром, и наружные, которые, как правило, выявляются внешним осмотром сварного изделия.

Задача технического контроля прежде всего сводится к тому, чтобы пользуясь различными способами контроля, *своевременно* обнаружить те или иные пороки и причины, вызывающие их, а также определить степень влияния пороков на качество и работоспособность изделия.

Необходимо отметить, что наличие в сварных соединениях пороков не всегда является браковочным признаком. Многочисленными опытами установлено, что в большинстве случаев количественное накопление отдельных качественных признаков приводит к браку продукции.

Большое разнообразие пороков, встречающихся в сварных конструкциях, и причин, вызывающих их появление, создает некоторые трудности в определении качества сварных конструкций, но тем не менее хорошо организованный контроль гарантирует их высокое качество, для чего необходимо знать классификацию пороков в сварных швах и соединениях и причин их возникновения.

1. ВНУТРЕННИЕ ПОРОКИ ПРИ СВАРКЕ ПЛАВЛЕНИЕМ И ИХ ВЛИЯНИЕ НА ПРОЧНОСТЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Непровары и их разновидности

Непровар — отсутствие сплавления, а следовательно, и структурной связи между прилегающими друг к другу объемами металла в сварном соединении.

Непровар может быть между основным и наплавленным металлом (в корне шва или по кромке), а также между отдельными

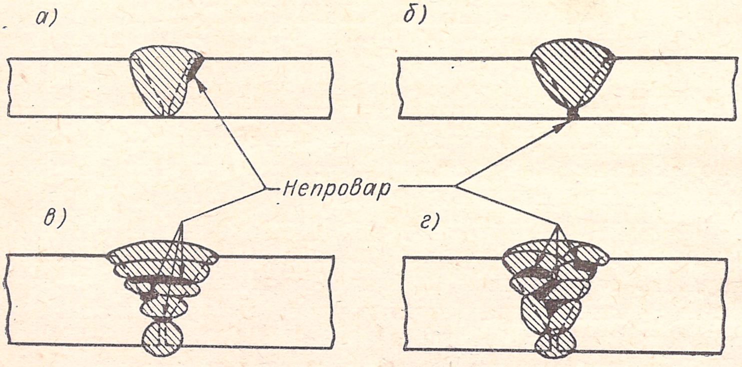
слоями (проходами) при многослойной сварке. Основные виды непроваров приведены на фиг. 1.

Причинами непроваров по кромкам при ручной электродуговой сварке могут быть:

1) плохая зачистка кромок свариваемых деталей от окалины, ржавчины, краски, шлака, масла и других загрязнений, препятствующих сплавлению с основным металлом;

2) блуждание или отклонение дуги под влиянием магнитных полей, особенно при сварке на постоянном токе;

3) недостаточная тепловая мощность дуги, вследствие чего жидкий металл заполняет шов, не обеспечивая провара кромок;



Фиг. 1. Непровары: *а* — по кромке с основным металлом; *б* — в корне шва; *в* — между отдельными слоями; *г* — между валиками.

4) неумение сварщика управлять дугой и обеспечивать равномерный обогрев и провар кромок;

5) чрезмерная длина дуги, что приводит к усиленному блужданию дуги и уменьшению коэффициента полезного действия ее.

Непровар по кромкам при электрошлаковой сварке может возникнуть из-за недостаточной температуры сварочной ванны вследствие малого электрического сопротивления расплавленного флюса и недостаточного тепловыделения.

Кроме указанных, возможными причинами непроваров в корне шва при ручной электродуговой сварке могут быть:

1) недостаточный угол скоса кромок;

2) большая величина притупления свариваемых кромок;

3) недостаточный зазор между кромками свариваемых деталей.

При автоматической сварке под флюсом непровар в корне шва появляется в том случае, если в зазор между кромками попадает излишний флюс.

Непровары между отдельными слоями наплавленного металла возникают по следующим причинам:

1) неполностью удален шлак, образовавшийся при наложении предыдущего валика, что возможно вследствие трудности его удаления или небрежности сварщика;

2) недостаточна тепловая мощность источника сварочного тепла;

3) длинная дуга, что приводит к возрастанию тепловых потерь и несплавлению с предыдущим слоем.

Возникновению непроваров также способствуют:

1) неудовлетворительное качество сварочных материалов (электродов, сварочной проволоки, флюсов и т. п.);

2) нарушение электрических характеристик сварочных установок и колебания силы сварочного тока и напряжения дуги в процессе сварки.

Непровар — один из наиболее распространенных и опасных пороков сварных швов. Непровар снижает прочность сварного соединения в зоне сплавления и может быть причиной разрушения изделия в процессе эксплуатации.

Исследования показали, что между прочностью сварного соединения при испытании его на статический разрыв и наличием в рабочем поперечном сечении шва непровара существует прямо пропорциональная зависимость, т. е. предел прочности сварного соединения на растяжение прямо пропорционален отношению площади сечения шва с доброкачественным проваром к его полной площади сечения. Таким образом, на сколько процентов сечение шва будет непроварено, на столько процентов и прочность шва на разрыв будет ниже прочности шва, не имеющего непровара.

Особо отрицательно проявляется действие непровара в изделиях, работающих на вибрационную нагрузку. В этом случае по кромкам непроваров возникает резкая концентрация напряжений, которая и приводит сварное соединение к разрушению.

Исследованиями [5, 30] установлено, что если непровар составляет 10% толщины листа, то вибрационная прочность сварного соединения снижается более чем в два раза. Непровар в стыковых швах приводит к усталостному разрушению по ослабленному сечению со значительным снижением предела выносливости. Наличие небольшого непровара (7—8% от толщины свариваемого металла) в стыковом шве для соединений из стали Ст.3 понижает предел усталости при испытании в условиях знакопеременного цикла с 14 до 8,5 *кГ/мм*². Отсюда следует считать непровар в сварных соединениях, особенно работающих под действием вибрационной нагрузки, *недопустимым пороком*.

В виде исключения допускаются местные непровары в неответственных конструкциях, а также в изделиях, допустимость непроваров в которых оговаривается ТУ, правилами, нормами и инструкциями на их изготовление. Например, в сварных швах трубопроводов для пара и горячей воды допускаются непровары до 15 % от толщины стенки, если она не превышает 20 *мм* и не свыше 3 *мм* — при толщине стенки свыше 20 *мм*.

Трещины внутренние и наружные

Трещины — частичное местное разрушение сварного соединения.

Трещины подразделяются:

1) по температуре образования — на холодные, возникающие при нормальной окружающей температуре или при температуре до 300° С, и горячие, возникающие при температурах 1100—1300° С;

2) по расположению относительно оси шва — на продольные и поперечные;

3) по расположению в сварном соединении — на трещины в наплавленном или в основном металле, или же в зоне термического влияния;

4) по размерам — на макротрещины, т. е. большого размера по глубине и протяженности, и микротрещины, обнаруживаемые вооруженным глазом.

В зависимости от характера напряжений (растяжение или сжатие), возникающих в сваренных элементах, трещины могут быть открытые, хорошо видимые (в растянутых элементах) или трудно обнаруживаемые (в сжатых элементах).

Трещины в зоне термического влияния, располагающиеся параллельно или перпендикулярно к оси шва, возникают обычно при сварке легированных закаливающихся сталей в результате быстрого охлаждения шва и околошовной зоны.

Продольные трещины по центру шва образуются, как правило, при высоких температурах (горячие трещины) в период кристаллизации наплавленного металла.

Образованию трещин способствуют следующие факторы:

1) сварка конструкционных легированных сталей в жестко заделанных контурах;

2) глубокий провар соединяемых деталей из толстолистовой кипящей стали вследствие повышенного содержания серы, ликвирующей в толще металла при кристаллизации слитка;

3) высокая скорость охлаждения при сварке углеродистых сталей, склонных к закалке на воздухе;

4) применеиие высокоуглеродистой электродной проволоки при автоматической сварке конструкционной легированной стали;

5) применение повышенных плотностей сварочного тока при наложении первого слоя многослойного шва толстостенных сосудов и изделий вследствие повышения доли участия основного металла в металле шва;

6) недостаточный зазор между кромками деталей при электрошлаковой сварке;

7) слишком глубокие и узкие швы (с малым коэффициентом формы провара) при автоматической сварке под флюсом;

8) повышенное содержание фосфора в основном металле и в сварочных материалах.

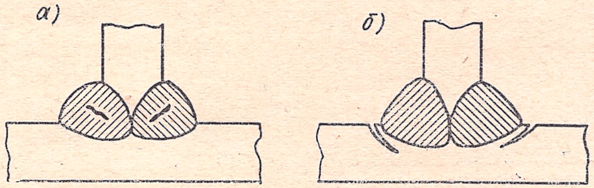
Возникновение трещин по указанным причинам усугубляется следующим:

1) чрезмерным нагромождением швов с целью «усиления» конструкции (применение накладок и т. п.), в результате чего возрастают сварочные напряжения, способствующие образованию надрывов и трещин в сварном соединении;

2) выполнением сварочных работ при низких температурах, что способствует образованию трещин вследствие понижения пластических свойств металла;

3) толщиной свариваемого металла — чем толще свариваемые элементы, тем больше вероятность образования трещин (при прочих равных условиях);

4) наличием в сварных соединениях других пороков, являющихся концентраторами напряжений, под действием которых возникают надрывы и трещины.



Фиг. 2. Трещины в сварных швах и соединениях: *а* — в наплавленном металле; *б* — в зоне сплавления и термического воздействия.

Следовательно, образование трещин при сварке — результат действия напряжений, вызываемых местным нагревом металла до расплавления с последующим быстрым затвердеванием и охлаждением.

На фиг. 2 показаны характерные типы трещин.

Трещины в сварных соединениях так же, как и непровары, относятся к числу наиболее опасных пороков, так как они, подобно непровару, уменьшают расчетное сечение шва и тем самым снижают его статическую прочность. Кроме того, являясь острыми концентраторами напряжений, трещины, расположенные в поперечном направлении относительно действующих усилий, резко снижают вибрационную прочность сварных конструкций.

Трещины при всех условиях следует считать недопустимым для сварной конструкции пороком.

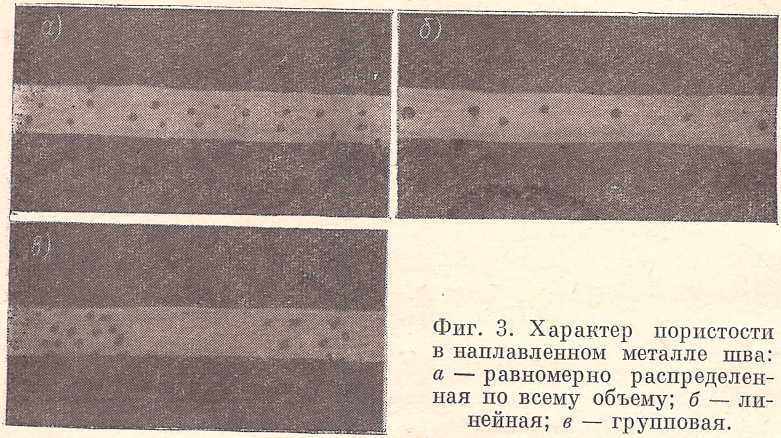
Пористость наплавленного металла

Поры в металле шва — различной величины пузырьки (как правило, сферической формы), заполненные газами. Поры образуются за счет тех газов, которые поглощаются жидким металлом сварочной ванны в процессе сварки. Известно, что чем выше температура жидкого металла, тем большее количество газов растворяется в нем. С охлаждением металла понижается растворимость в нем газов и последние стремятся выделиться из металла. Однако

кристаллизирующийся металл шва препятствует выходу газов, вследствие чего часть из них остается в металле шва, образуя внутренние поры и раковины, размер которых обычно не превышает 1,5—2 *мм* в диаметре или же составляет десятые и даже сотые доли миллиметра.

Распределение пор может быть равномерное по всему объему наплавленного металла (фиг. 3, *а*), линейное в виде цепочки (фиг. 3, *б*), групповое в виде отдельных скоплений (фиг. 3, *в*) и, наконец, встречаются одиночные поры.

Важнейшими причинами образования пор в сварных швах являются:



Фиг. 3. Характер пористости в наплавленном металле шва: *а* — равномерно распределенная по всему объему; *б* — линейная; *в* — групповая.

1) наличие в составе некоторых электродных покрытий органических составляющих (крахмала, декстрина и т. п.), в результате разложения которых может происходить насыщение металла шва водородом и окисью углерода;

2) повышенное содержание углерода в основном металле или сварочном материале, в результате чего за счет выгорания углерода в металле шва будут образовываться поры, заполненные окисью углерода и углекислым газом;

3) повышенная влажность электродного покрытия, флюса, или выполнение сварочных работ в сырую погоду приводит к образованию паров воды, при диссоциации которых выделяется водород, растворяющийся в жидком металле;

4) высокая скорость сварки, приводящая к быстрому затвердеванию сварочной ванны, что препятствует полному выходу газов из наплавленного металла;

5) плохая очистка кромок свариваемого металла перед сваркой от ржавчины, масла, краски и т. п.

Поры, в зависимости от их количества, размера, места расположения и характера нагрузки, воспринимаемой конструкцией,

оказывают различное влияние на статическую и вибрационную прочность.

Как показали исследования, пористость в стыковых соединениях не является таким пороком, который резко ограничивает статическую прочность при положительной и отрицательной температурах.

Установлено [31], что одиночные поры не снижают вибрационную прочность сварного соединения. С увеличением количества пор предел выносливости незначительно падает, оставаясь в пределах допускаемых напряжений, и только при наличии цепочки пор становится ниже допускаемых. Даже при наличии большого числа пор, расположенных цепочкой в стыковом шве с неснятым усилением, разрушение происходит по краю усиления, что свидетельствует о бóльшей концентрации напряжений, вызываемых усилением шва, по сравнению с концентрацией напряжений, вызываемых порами.

Исследованиями подтверждено также, что пористость в стыковых соединениях с неснятым усилением, характер которой изменяется в достаточно широких пределах (от единичных и групповых пор и до их расположения в виде цепочки внутри шва и на поверхности), не оказывает резкого влияния на снижение вибрационной прочности.

В стыковых швах со снятым усилением только единичные поры заметно не снижают вибрационную прочность. Пористость в швах в виде цепочки тесно примыкающих друг к другу пор резко снижает вибрационную прочность соединения. Это объясняется тем, что при снятии усиления шва круглая форма пор нарушается, появляются резкие концентраторы напряжений, приводящие к понижению вибрационной прочности.

Исследуя влияние групповых пор в сварных швах на механическую прочность сварных соединений, Г. В. Жемчужников установил понижение предела прочности углового и таврового соединений на 14—15% при одновременном резком понижении пластичности[1].

Поры в угловых швах оказывают отрицательное влияние на прочность в большей степени при повторной нагрузке, чем при статической, особенно в условиях отрицательной температуры. Поры в угловых швах заметно снижают вибрационную прочность сварных элементов конструкций, так как концентрация напряжений, создаваемая порами, может достигать значительной величины.

При оценке влияния пор в сварных швах на прочность и работоспособность конструкции следует учитывать не только статическую и вибрационную прочность соединения, но и требования, предъявляемые к сплошности металла шва, так как в ряде случаев сварные соединения должны быть непроницаемы по отношению

[1] «Автоматическая сварка», 1952, № 4.

к жидкостям и газам. При значительной групповой пористости это требование может быть не обеспечено.

Кроме того, поры уменьшают рабочее сечение шва, а следовательно, они понижают предел прочности.

И, наконец, пористость способствует (хотя в значительно меньшей мере, чем непровары и трещины) концентрации напряжений и снижению вибрационной прочности.

Таким образом, пористость металла шва — порок, который в зависимости от конкретных условий может быть допустимым или недопустимым, что определяется ТУ и нормами на изготовление той или иной конструкции.

Шлаковые включения

Шлаковые включения в металле сварного шва — небольшие объемы, заполненные неметаллическими веществами (шлаками, окислами). Эти включения в наплавленном металле имеются всегда и их наличие подтверждается тем, что при самых совершенных способах сварки удельный вес наплавленного металла малоуглеродистой стали $\gamma = 7{,}83$ *Г/см*^{3} (в среднем), тогда как основной металл имеет $\gamma = 7{,}86$ *Г/см*^{3}.

Величина шлаковых включений колеблется от микроскопических размеров до нескольких миллиметров в поперечнике. Общее содержание включений в хорошо выполненном шве не превышает 0,5% от веса наплавленного металла. В плохо выполненном шве количество включений достигает 2—3%, а иногда и больше.

Форма шлаковых включений может быть самой различной, от круглой, шарообразной до плоской, вытянутой в виде пленки, разделяющей прилегающие объемы наплавленного металла.

Химический состав шлаковых включений определяется составом электродных покрытий, сварочных флюсов, образующих при плавлении шлак, а также теми реакциями окисления, которые протекают в жидком металле сварочной ванны с образованием окислов. Чаще всего при сварке сталей шлаковые включения представляют собой химические соединения в виде MnO, SiO_2, Cr_2O_3 и др., а также сульфиды MnS, FeS, т. е. все то, что, расплавляясь, взаимодействует с металлом, перемешивается в сварочной ванне, в каплях расплавленного электрода и на торце последнего.

В условиях сварочного процесса перемешивание шлака с металлом происходит под действием высокой температуры столба дуги (около 6000° С). Капли металла, покрытые шлаком, попав в условия такой температуры, бурно кипят, в результате чего происходит чрезвычайно интенсивное перемешивание металла и шлака.

Кроме того, при высоких температурах в жидком металле происходит выделение CO за счет реакции восстановления окислов по уравнениям

$$MnO + C = Mn + CO;$$

$$SiO_2 + 2C = Si + 2CO.$$

Реакции восстановления Mn и Si углеродом оказывают воздействие на процесс перемешивания металла со шлаком в том отношении, что чем больше углерода в сварочной проволоке или в электроде, тем больше образуется капель в единицу времени, тем сильнее перемешивание. Указанными реакциями объясняется появление газовых пор.

Шлаковые включения возникают по следующим причинам:

1) высокий удельный вес или тугоплавкость шлака;

2) плохая отделимость шлака от поверхности шва при многопроходной сварке стыковых и особенно угловых швов;

3) нарушение нормального термического цикла процесса сварки, приводящее к повышенной скорости кристаллизации сварочной ванны в связи с большой скоростью охлаждения;

4) наличие загрязненных поверхностей свариваемых кромок или плохая очистка шлака при многослойной сварке;

5) недоброкачественное электродное покрытие (покрытия нанесено больше, чем следует, или оно дает вязкий густой шлак и др.);

6) недостаточная квалификация сварщика и др.

Шлаковые включения оказывают влияние на статическую и вибрационную прочность сварного соединения в зависимости от их количества, размера и формы. Мелкие шлаковые включения, а также шлаковые включения, имеющие сферическую форму, влияют на статическую и вибрационную прочность так же, как поры, т. е. незначительно снижают предел прочности и предел выносливости.

Опасны резко снижающие вибрационную прочность шлаковые включения, расположенные близко к поверхности шва, еще более опасны частично выходящие на поверхность и имеющие вытянутую форму. Такие включения представляют собой острые местные надрезы, способствующие резкой концентрации непряжений и значительному снижению вибрационной прочности.

Шлаковые включения, расположенные внутри стыка в виде отдельных коротких прослоек в толще наплавленного металла, менее резко снижают вибрационную прочность стыкового соединения.

Учитывая трудность точного определения расположения шлаковых включений в сечении сварного шва обычно применяемыми методами контроля, а также резкое влияние этого порока на концентрацию напряжений вследствие остроты формы, следует при определении качества сварной конструкции осторожно относиться к допущению указанного порока.

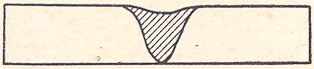
Небольшое количество мелких шлаковых включений сферической формы не представляет опасности для прочности сварных конструкций; эти включения можно считать допустимым пороком.

Крупные шлаковые включения и в большом количестве являются недопустимым пороком и основанием к браковке сварного соединения.

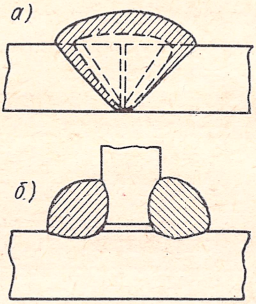
2. НАРУЖНЫЕ ПОРОКИ ПРИ СВАРКЕ ПЛАВЛЕНИЕМ

Отклонение размеров и формы рабочего сечения шва от проектных

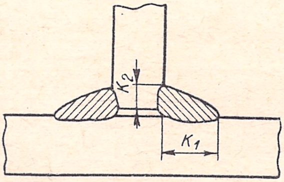
Одним из признаков доброкачественного выполнения сварочных работ является соблюдение размеров и формы сварных швов, установленных проектом, их хороший внешний вид. Как уменьшение, так и увеличение геометрических размеров швов считается дефектом. Уменьшение размеров швов приводит к уменьшению рабочего сечения, а следовательно, к понижению прочности свар-



Фиг. 4. Неполномерный стыковой шов.



Фиг. 5. Чрезмерные размеры швов.



Фиг. 6. Неравные катеты угловых швов.

ного соединения. Увеличение размеров швов по сравнению с проектными, кроме повышения расхода сварочных материалов, электроэнергии и рабочего времени, приводит к росту остаточных деформаций, увеличению зон термического влияния, а в итоге к снижению прочности.

Отклонениями размеров и формы шва являются;

1) неполномерность стыковых швов (фиг. 4);

2) чрезмерная ширина и высота стыкового шва (фиг. 5, *а*) и большая высота углового шва (фиг. 5, *б*);

3) неравномерная ширина шва;

4) неравномерная высота шва;

5) неравные катеты ($k_1 > k_2$) угловых швов (фиг. 6) и др.

Отклонения геометрических размеров швов от проектных могут возникнуть по следующим причинам.

1. Повышенные углы разделки и чрезмерные зазоры между кромками свариваемых деталей при автоматической сварке приводят к неполномерности швов.

2. Повышенные сварочный ток и напряжение на дуге, малая скорость сварки способствуют образованию широких и высоких стыковых швов.

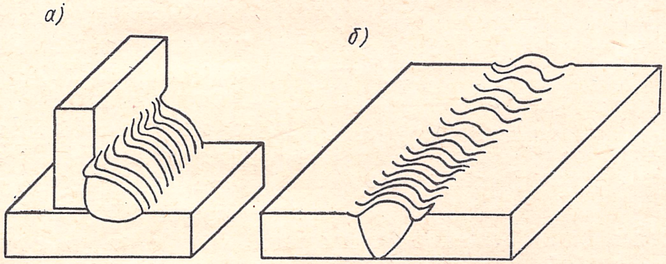
3. Неправильная подготовка кромок под сварку с переменным углом разделки по длине и наличием выхватов приводит к неравномерной ширине и высоте швов.

4. Неудобное пространственное положение при выполнении углового шва, неправильное перемещение электрода в процессе сварки или неправильный угол наклона сварочной проволоки при автоматической сварке под флюсом способствуют образованию неравных катетов.

5. Небрежность сварщика или недостаточная квалификация его; низкое качество сварочных материалов и др.

Подрезы

Подрезом называется углубление в основном металле (фиг. 7, *а*, *б*), идущее вдоль границы шва. Глубина подреза может колебаться от десятых долей до нескольких миллиметров. Подрезы



Фиг. 7. Подрезы: *а* — в угловом соединении; *б* — в стыковом соединении.

могут быть местные, т. е. только вдоль некоторых участков шва, или вдоль всего шва.

Причинами, вызывающими этот вид порока, являются:

1) чрезмерная тепловая мощность дуги;

2) неудобное пространственное положение шва, при недостаточном практическом опыте сварщика;

3) неправильное положение электрода (фиг. 8, *а*) и низкое напряжение на дуге при автоматической сварке под слоем флюса, особенно при сварке угловым швом;

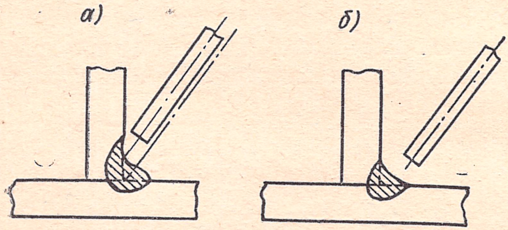
4) слишком тугоплавкий флюс при электрошлаковой сварке, приводящий к отжиманию ползунов и образованию подрезов;

5) небрежность сварщика.

Подрезы и их влияние на прочность сварных конструкций должны оцениваться и приниматься в расчет в зависимости от их протяженности, глубины, направления по отношению действующих усилий и характера нагрузки, воспринимаемой конструкцией.

Чем больше по длине и глубине подрез, тем неблагоприятнее (при прочих равных условиях) его действие на прочность.

Исследованиями установлено, что наличие подрезов в стыковых и угловых швах, расположенных поперек действующих усилий, приводит к резкому повышению концентрации напряжений и чрезвычайно резкому снижению вибрационной прочности. Даже достаточно крупные подрезы, расположенные вдоль действующего усилия, отражаются на прочности в несравнимо меньшей степени, чем подрезы, расположенные поперек. Подрезы [30], расположенные поперек действующих усилий и ослабляющие сечение на 10—12%, не снижают статической прочности соединения как при нормальной, так и при низкой ($-40 \div -50°C$) температурах. Подрезы в стыковых швах, расположенных поперек действующих усилий, значительно снижают деформационную способность соединений, если стык находится в зоне концентрации напряжений. В этих случаях разрушение происходит хрупко через порок.



Фиг. 8. Подрез, вызванный неточным положением электрода (*а*) и точное положение электрода, исключающее подрез (*б*).

Подрезы следует считать недопустимым пороком в том случае, если конструкция относится к типу ответственных и предназначена работать в условиях вибрационной нагрузки.

Небольшой протяженности подрезы, ослабляющие сечение не более чем на 5%, в неответственных конструкциях, работающих под действием статических нагружений, можно считать допустимым пороком.

Наплывы и натеки

Наплывы и натеки — это излишне наплавленный металл на наружной части шва, наплывший или натекший с прилегающих участков шва под действием силы тяжести и создавший чрезмерную высоту («усиление») шва.

Причинами образования наплывов и натеков могут быть:

1) чрезмерная длина сварочной дуги, а также ее блуждание и отклонение от сварочной ванны в сторону (при сварке на постоянном токе);

2) неудобное пространственное положение шва (горизонтальное, вертикальное, потолочное);

3) слишком малая скорость сварки при чрезмерной скорости плавления электродной проволоки — при сварке под флюсом;

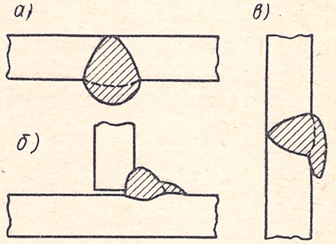
4) чрезмерный наклон плоскости, на которую накладывается сварной шов (при автоматической сварке под флюсом «на подъем»);

5) неправильное ведение электрода или неправильное смещение электродной проволоки при сварке кольцевых швов под флюсом;

б) выполнение вертикальных швов снизу вверх и недостаточный опыт сварщика.

На фиг. 9 показаны различные виды наплывов и натеков.

Наплывы и натеки, резко изменяя очертания швов, образуют концентраторы напряжений и тем самым снижают вибрационную прочность сварных соединений. Степень их влияния на прочность должна оцениваться в зависимости от протяженности и резкости отклонения формы шва от нормальной.



Фиг. 9. Наплывы и натеки при выполнении: *а* — потолочного шва; *б* — углового шва; *в* — горизонтального шва.

Наплывы и натеки, имеющие большую протяженность, следует считать недопустимыми пороками, так как они, кроме того, что вызывают концентрацию напряжений, нередко сопровождаются непроварами.

Небольшие местные наплывы и натеки, вызванные случайными отклонениями сварочных режимов от нормальных, можно считать допустимыми пороками.

Пористость и ноздреватость, выходящие на поверхность наплавленного металла

Иногда при дуговой сварке толсто покрытыми электродами, особенно при автоматической сварке под флюсом, поры выходят из толщи наплавленного металла на поверхность. В этом случае поры приобретают вид вытянутых кверху цилиндрических полостей, которые называются свищами или ноздрями.

Причины появления такого дефекта те же, что и внутренней пористости — растворенные в металле газы. Образованию ноздреватости способствует вязкий шлак с плохой газопроницаемостью, через который газы (при условии сильного газовыделения), вышедшие на поверхность наплавленного металла, окончательно удалиться не могут, оставаясь под шлаком.

Этот порок недопустим, так как поры, выходящие на поверхность, являются более опасными концентраторами напряжений в сравнении с внутренними. Кроме того, они портят внешний вид сварного изделия и свидетельствуют о возможности внутренней пористости.

Прожоги

Прожог — это сквозное проплавление свариваемых элементов с выходом жидкого металла сварочной ванны на другую сторону.

Прожог чаще всего встречается при сварке металла небольших толщин и сварке стыковых швов, выполняемых с глубоким проваром, приближающимся к толщине свариваемого металла, а также при сварке снизу вверх вертикальных угловых швов.

Причинами прожога могут быть:

1) завышенная тепловая мощность, вызванная чрезмерной величиной сварочного тока или чрезмерной мощностью сварочной горелки;

2) чрезмерный зазор между кромками свариваемых элементов;

3) неплотное прилегание флюсовой подушки или металлической подкладки при автоматической сварке под флюсом;

4) слишком малая скорость сварки.

Во всех случаях отверстия, возникающие при прожогах, хотя и заделываются, однако шов в этом месте получается неудовлетворительным по внешнему виду и неполноценным по качеству.

В ответственных конструкциях прожоги являются недопустимым пороком.

Незаделанные кратеры

Кратер — углубление, образующееся в конце шва при внезапном перерыве процесса сварки. Особенно часто встречаются кратеры при выполнении коротких прерывистых швов.

Единственной причиной возникновения такого дефекта является небрежное отношение сварщика к выполняемой работе.

Незаделанные кратеры оказывают весьма неблагоприятное воздействие на прочность сварного соединения, так как являются концентраторами напряжений. А. Е. Аснис при испытании сварных балок на вибрационную прочность наблюдал случаи значительного снижения предела выносливости в связи с недостаточно хорошо заделанными кратерами. Снижение прочности колебалось в пределах 25—50%, в зависимости от марки стали (малоуглеродистая 25%; низколегированная — 40—50%).

Незаделанные кратеры следует считать недопустимым пороком.

Недопустимые деформации и коробления сварных конструкций

Деформации и коробления, т. е. отклонение формы сварной конструкции от проектной, встречается всегда и является следствием неравномерного местного нагрева и охлаждения изделия при сварке. Эти деформации, в зависимости от целого ряда причин, могут быть различны по величине.

На увеличение деформаций до недопустимых пределов могут влиять:

1) проектирование сварной конструкции с излишне большим количеством сварных швов и соединений;

2) нарушение технологического процесса сборки и сварки конструкции;

3) неправильный порядок выполнения сварных швов;

4) завышенная погонная энергия при сварке;

5) превышение размеров катетов угловых швов против требуемых по расчету.

Уменьшению деформаций способствуют:

1) соблюдение последовательности наложения швов, которая определяется технологией сборки и сварки конструкции;

2) уменьшение зазоров в стыковых швах;

3) предварительные выгибы свариваемых элементов в направлении, компенсирующем сварочные деформации;

4) правильный тепловой режим в процессе сварки.

3. ПОРОКИ ПРИ КОНТАКТНОЙ СВАРКЕ

Пороки сварных соединений, выполненных контактной сваркой в стык, точками и непрерывным швом, имеют свои особенности по сравнению с пороками при сварке плавлением, причем пороки при точечной и роликовой сварке аналогичны.

П р и с т ы к о в о й с в а р к е могут возникнуть следующие пороки: непровар, подгар поверхности деталей, отсутствие соосности, пережог и перегрев металла.

Н е п р о в а р может быть обнаружен по расслоению в виде полоски на выдавленном из сварного соединения металле и по недостаточному нагреву металла в зоне, прилегающей к соединению, что может быть выявлено по цветам побежалости. Причинами непровара могут быть:

1) недостаточный нагрев вследствие малого тока или малого времени выдержки изделия под током;

2) слишком большое или слишком слабое давление;

3) недостаточное оплавление;

4) большая скорость оплавления;

5) малая осадка под током в процессе сварки и после выключения тока;

6) недостаточный предварительный нагрев;

7) загрязненные поверхности свариваемых деталей.

Трещины встречаются главным образом при сварке легированных закаливающихся сталей и могут выходить на поверхность или быть скрытыми внутри металла.

Причинами этого порока являются:

1) чрезмерно большая сила тока при малом времени выдержки под током (жесткий режим);

2) сильное охлаждение металла в зоне сварки;

3) недостаточный предварительный нагрев;

4) малая осадка под током.

П о д г а р п о в е р х н о с т и д е т а л е й обнаруживают по раковинам и трещинам в местах подгара, а также по подкаленным местам на детали вдали от зоны сварки.

Появление этого порока могут вызвать следующие причины:

1) недостаточная сила зажатия детали в контактных устройствах;

2) загрязнение поверхности деталей, соприкасающихся с контактными поверхностями зажимных устройств;

3) плохое охлаждение контактных устройств при сильном их нагреве;

4) перекос деталей при их установке в зажимные устройства сварочной машины;

5) низкая теплопроводность и электропроводность зажимных контактных устройств.

Отсутствие соосности стыкуемых элементов возникает вследствие:

1) отсутствия центрирующих устройств в контактных зажимах;

2) изношенности направляющих станины и подвижной плиты;

3) недостаточной силы зажатия деталей и смещения их при установке;

4) большой длины выступающих из зажимных устройств концов деталей;

5) быстрой изнашиваемости контактных устройств.

Пережог и перегрев металла в месте сварного соединения обнаруживают по большой зоне разогретого металла или по окислам, надрывам и трещинам на поверхности соединения. В изломе такого соединения встречаются раковины, трещины и ему свойственна крупнозернистая структура.

Причинами этого порока могут быть:

1) чрезмерная сила сварочного тока при большой выдержке свариваемых деталей под током;

2) длительное время оплавления;

3) большая длительность прогрева свариваемых деталей.

При точечной и роликовой сварке встречаются следующие пороки: непровар, трещины и перегрев.

Непровар обнаруживают по отсутствию или малой зоне цветов побежалости, а также отсутствию вмятин в свариваемом металле.

Причины непровара при точечной и роликовой сварке, в основном так же, как и при стыковой сварке, зависят от сварочного режима, а кроме того, могут быть следующие:

1) большая площадь контактной поверхности, что приводит к понижению плотности тока;

2) шунтирование тока ранее сваренными соседними точками;

3) загрязненная поверхность контактов;

4) неисправность сварочной машины.

Трещины встречаются при сварке закаливающихся сталей и обнаруживаются на поверхности вмятины в виде тонких линий, выходящих из центра точки, или в зоне термического влияния в виде серповидной линии.

Причины вызывающие трещины, следующие:

1) жесткий режим сварки;

2) большая скорость охлаждения точки или шва;

3) длительное время сварки.

Перегрев обнаруживается по большой и глубокой контактной вмятине в свариваемом металле, увеличенной зоне цветов

побежалости, свидетельствующей о перегреве, а также по сильному окислению поверхностей сваренных участков.

Причинами возникновения этого порока являются:

1) чрезмерно мягкий режим сварки;
2) недостаточное давление, передаваемое на контакты;
3) близкое расположение точек или шва к краю детали;
4) плохое прилегание свариваемых элементов друг к другу.

Пороки в разной степени влияют на качество и работоспособность сварных соединений; допустимость или недопустимость пороков определяется ТУ и правилами изготовления тех или иных изделий.

Следует отметить, что пороки в сварных швах и соединениях могут быть вызваны неудачным проектированием самой сварной конструкции, в частности проектированием без учета особенностей технологического процесса сварки и сопровождающих ее явлений.

Недостатки конструкции должны быть устранены заранее, до того как проект принят в производство. Поэтому при правильном проектировании проект сварной конструкции следует согласовать (в части его технологичности изготовления сваркой) со специалистом, инженером-сварщиком.

4. ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКТИВНЫХ ФОРМ НА ПРОЧНОСТЬ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Преимущества сварных конструкций перед конструкциями, изготовленными другими способами, с применением иных технологических процессов бесспорны. Этим объясняется все более широкое применение сварочных процессов для изготовления разнообразных по своему типу и назначению изделий, сооружений и конструкций из различных металлов и сплавов. Накопленный опыт по проектированию, изготовлению и эксплуатации сварных конструкций убедительно подтверждает возможность создания прочных и работоспособных сварных конструкций для самых различных условий их эксплуатации.

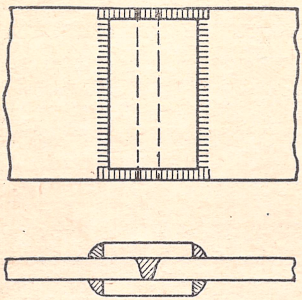
На прочность и работоспособность сварных конструкций, кроме различных пороков, оказывает существенное влияние конструктивное решение формы сварных соединений.

Если в ряде случаев неудачное конструктивное оформление сварного соединения не оказывает значительного влияния на его статическую прочность, то вибрационная прочность при неудачной форме сварного соединения резко понижается. Отрицательно влияет на вибрационную прочность концентрация напряжений, вызываемая резкими изменениями конструктивных форм изделия, резкими переходами от одного сечения к другому.

Многочисленными исследованиями установлено, что лучшим стыковым сварным соединением является соединение, осуществляемое с помощью стыкового шва. Применение так называемых

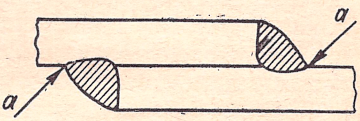
«усиливающих» накладок с введением лобовых и фланговых швов (фиг. 10) значительно снижает вибрационную прочность стыкового соединения и может в 2—3 раза и более снизить его усталостную прочность.

Исследуя случаи разрушения сварных цилиндрических резервуаров, А. С. Фалькевич [45] отмечает, что образование трещин наблюдалось в стыковых швах, обычно усиленных накладками. Отсюда следует, что стыковое сварное соединение, «усиленное» накладками, является конструктивно неудачной формой и его применение должно быть ограничено (особенно в конструкциях, воспринимающих вибрационную нагрузку, вследствие его отрицательного влияния на вибрационную прочность).



Фиг. 10. Сварное соединение, «усиленное» накладками, приваренными лобовыми и фланговыми швами.

К числу неудачных конструктивных форм, применяемых в сварных конструкциях, относится также соединение внахлестку, которое в ряде конструкций предпочитают другим типам соединений, так как оно обеспечивает более простое сопряжение элементов и упрощает процесс сборки, поскольку не требуется соблюдения точности в размерах сопрягаемых элементов. Однако такое соединение не обеспечивает плавность передачи силового потока от одного элемента соединения к другому, так как в местах перехода (в точках *а*) возникают концентраторы напряжений (фиг. 11). Неравномерность распределения напряжений при передаче усилий вызывает местные перенапряжения и может привести к разрушению конструкций вследствие того, что всякая концентрация напряжений изменяет свойства материала, понижая его сопротивляемость хрупким разрушениям, особенно при вибрационной нагрузке.



Фиг. 11. Сварное соединение внахлестку.

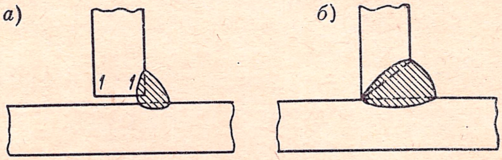
Таким образом, соединение внахлестку следует применять для неответственных конструкций, воспринимающих статическое нагружение. В ответственных сварных конструкциях его необходимо заменять стыковым.

Неудовлетворительной конструктивной формой является тавровое соединение, выполненное угловым швом с одной стороны.

По данным А. Е. Аснис [1], концентрация напряжений в тавровых соединениях, сваренных с одной стороны (фиг. 12, *а*), настолько велика, что предел выносливости составляет всего лишь около 30% предела выносливости соединения, выполненного с полным проваром (фиг. 12, *б*). В данном случае непровар по линии

1—1 (фиг. 12, *а*), являясь чрезвычайно острым надрезом, резко понижает вибрационную прочность.

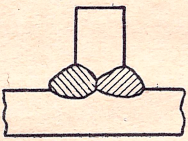
Таким образом, тавровые соединения, осуществляемые угловым швом с одной стороны, без полного провара, в ответственных конструкциях применять не следует ввиду их низкой вибрационной прочности.



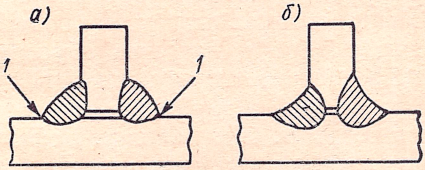
Фиг. 12. Сварное тавровое соединение: *а* — без провара; *б* — с полным проваром.

Для обеспечения высокой вибрационной прочности рекомендуется осуществлять тавровое соединение двусторонними угловыми швами с полным проваром (фиг. 13).

Вибрационная прочность сварного соединения при прочих равных условиях зависит от формы шва. Так, например, тавровое соединение, выполненное угловыми швами с выпуклой поверхностью (фиг. 14, *а*) обладает меньшей вибрационной прочностью, чем тавровое соединение, имеющее швы с вогнутой поверхностью (фиг. 14, *б*). В первом



Фиг. 13. Двусторонние угловые швы с полным проваром.



Фиг. 14. Двусторонние угловые швы: *а* — с выпуклой поверхностью; *б* — с вогнутой поверхностью.

случае наблюдается резкий переход от поверхности шва к поверхности основного металла, что приводит к повышению концентрации напряжений в точках *1*. Во втором случае обеспечена плавность перехода поверхности шва к поверхности основного металла, что уменьшает концентрацию напряжений и повышает вибрационную прочность соединения.

В сварной конструкции, при недостаточно внимательном отношении конструктора или его неосведомленности, могут быть допущены неудачные формы соединений, снижающие вибрационную прочность сварных соединений и работоспособность сварной конструкции в целом. Поэтому при проектировании сварной конструкции, рассчитанной на восприятие вибрационных переменных нагрузок следует стремиться к исключению резких концентраторов напряжений или к их смягчению путем плавных сопряжений и переходов от одного сечения элемента конструкции к другому.

ГЛАВА II

ОРГАНИЗАЦИЯ И МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА

5. ВОПРОСЫ ОРГАНИЗАЦИИ ТЕХНИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ

Необходимость контроля

Качество сварной продукции зависит от совокупности целого ряда факторов, рассмотренных в главе I, и в том числе от внимания исполнителей работ. При ослаблении внимания как со стороны рабочих, так и инженерно-технического персонала качество сварных конструкций понижается, наблюдается рост брака, повышаются производственные затраты на изготовление конструкции и тормозится нормальный ритм производства. Необходимость технического контроля качества обусловливается и тем, что даже тщательно разработанная технология изготовления сварной конструкции не может гарантировать от случайного появления дефектов в сварных соединениях. Дефекты случайного происхождения могут снизить прочность и работоспособность сварной конструкции, а иногда привести к аварии.

Следует отметить, что сварка, как прогрессивный технологический процесс, все шире применяется для изготовления таких конструкций и сооружений, к которым предъявляются исключительно высокие требования. Для своевременного выявления дефектов, которые могут возникнуть в сварных соединениях ответственных конструкций, также необходим тщательный систематический контроль.

Анализ некоторых случаев аварий сварных конструкций свидетельствует о том, что одной из причин аварий является слабый технический контроль или его отсутствие на некоторых стадиях производства.

Таким образом, технический контроль качества сварных соединений и конструкций является очень важным, неотъемлемым элементом на всех стадиях производства.

Задачи контроля

Основная задача контроля — повысить качество сварных конструкций. Выполнение этой задачи обеспечивается системой организационно-технических мероприятий.

Определение качества продукции является функцией аппарата отдела технического контроля предприятия. Этот отдел имеет следующие задачи:

1) выявление и изъятие в процессе производства брака, т. е. продукции, которая не удовлетворяет (полностью или частично) установленным требованиям;

2) установление и учет брака, а также причин и виновников его;

3) систематическое изучение качества продукции;

4) участие в разработке профилактических мер по предупреждению брака и повышению качества продукции.

Задача предупреждения брака является наиболее важной.

Схемы организации контроля

Единой, обязательной для всех отраслей производства, схемы организации отделов технического контроля нет. На каждом заводе и даже в каждом цехе строится своя схема контроля, исходя из особенностей производства.

На многих заводах контроль качества сварочных работ осуществляется отделом технического контроля, подчиненным непосредственно директору завода.

Существует и смешанная система организации контроля, при которой ОТК завода контролирует все исходные материалы, применяемые при изготовлении изделий, и осуществляет окончательный контроль готовой продукции. Пооперационный контроль в процессе производства выполняется контролером цеха, подчиняющимся начальнику цеха.

При любой схеме ОТК контроль должен быть организован так, чтобы ответственность за качество сварки ни в какой степени не снималась с непосредственных исполнителей работ (сборщиков, сварщиков) и их руководителей (бригадиров, мастеров).

Определение объема технического контроля находится в прямой зависимости от технологии производства, степени его освоения, массовости (повторяемости) продукции, квалификации персонала (как производственного, так и контролирующего) и ответственности конструкции.

Исходя из этого принципа, в случае недостаточно налаженного производственного процесса изготовления конструкции сваркой (например при освоении новой продукции) рекомендуется жесткий пооперационный контроль, осуществляемый специальным штатом контролеров, а также цеховым технологом.

При установившемся технологическом процессе функции контроля по отдельным операциям могут быть возложены непосредственно на низовых руководителей производства и даже на самих рабочих. В этом случае аппаратом ОТК предприятия производится так называемый «летучий контроль» для выборочной проверки качества сварки отдельных узлов, деталей, операций. Для

осуществления подобного контроля требуются контролеры высокой квалификации.

В случае организации контроля конструкций и сооружений, к сварным соединениям которых предъявляются исключительно высокие требования, не допускающие никаких качественных отклонений, следует исходить из принципа: *чем выше требование, предъявляемое к конструкции, тем более жесткий контроль необходим при ее изготовлении.*

Практика организации технического контроля показывает, что высокое качество сварных конструкций и соединений может быть обеспечено только при условии строгого соблюдения пооперационного контроля. При этом контрольные операции разделяются на три этапа:

1) предварительный контроль перед сваркой, включающий проверку технологичности сварной конструкции, соответствия исходных материалов, применяемых для ее изготовления, техническим условиям, проверку сварочного оборудования, оснастки, инструментов, квалификации сварщиков и т. п.;

2) контроль в процессе производства с целью проверки правильности заготовки, сборки, соблюдения технологических режимов, размеров и качества сварных швов, последовательности их наложения;

3) контроль готовой продукции (приемо-сдаточные испытания).

Контроль на первых двух этапах позволяет предупредить брак и тем самым выполнить основную задачу технического контроля.

Объекты контроля

Объекты технического контроля сварных конструкций достаточно многосторонни, но объем контроля должен быть подчинен принципу экономичности, т. е. необходимости и достаточности.

При организации пооперационного контроля до начала изготовления сварной конструкции должны быть тщательно проверены все применяемые материалы, оборудование и инструмент, используемый при изготовлении, и установлена необходимая квалификация сварщиков. Основной материал, его химический состав, механические свойства и свариваемость, а также качество электродов, сварочной проволоки и флюса подвергаются проверке только в том случае, если на указанные материалы нет сертификатов и других ТУ или сварочные свойства основного материала недостаточно изучены.

В процессе изготовления конструкции контролю подлежат: правильность заготовки, подготовка и сборка под сварку, соблюдение технологических режимов сварки, последовательность наложения швов, размеры швов и их качество.

Готовое сварное изделие является объектом для окончательного контроля качества, в процессе которого проверяются общие размеры конструкции в соответствии с ТУ и чертежами, общая

прочность (путем приемо-сдаточных испытаний). Необходимо отметить, что, если был организован тщательный предварительный контроль, а также пооперационный контроль в процессе изготовления, то высокое качество готовых изделий, как правило, будет обеспечено.

6. МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ КАЧЕСТВА

Классификация методов

Все методы технического контроля качества сварных соединений и конструкции могут быть разделены на шесть групп в соответствии с целями контроля.

Группа 1 включает способы химических, механических, металлографических и коррозионных испытаний. Пользуясь этими способами, можно определить химический состав и свойства свариваемых металлов и сплавов, свойства сварочных материалов, а также состав и свойства наплавленного металла шва и сварных соединений.

Группа 2 включает контроль внешним осмотром, люминесцентный и цветной методы дефектоскопии. При помощи этих методов можно определить наличие или отсутствие внешних дефектов.

Контроль внешним осмотром при использовании несложных приспособлений и инструментов позволяет проверить правильность заготовок деталей сварной конструкции и их подготовки под сварку, правильность сборки конструкции, выполнения технологических режимов в процессе сварки, обмера общих размеров конструкции и калибра швов, определить качество сварных швов по их внешнему виду, а также установить видимые наружные дефекты.

Люминесцентным и цветным методами дефектоскопии можно выявить наружные дефекты в виде мелких и тонких трещин, волосовин, расположенных обычно в сжатых элементах и не обнаруживаемых простым внешним осмотром.

Группа 3 включает методы контроля посредством магнитной, рантгено-, гамма- и ультразвуковой дефектоскопии. Пользуясь этими методами, можно обнаружить внутренние пороки наплавленного металла и сварных соединений без разрушения последних.

Группа 4 объединяет методы, посредством которых можно определить герметичность (непроницаемость) сварных швов и соединений для жидкости и газов. К этим методам относятся: гидравлические и пневматические испытания сварных конструкций, испытания сварных швов и соединений при помощи химических реакций и керосином, испытания замкнутых объектов гелиевым течеискателем и на вакуум.

Группа 5 включает способы, посредством которых можно определить качество сварных соединений и конструкций в

результате полного или частичного их разрушения. Сюда относятся способы: полного разрушения конструкций, модели, отдельного узла, блока; частичного разрушения конструкции посредством вырезки и испытания отдельных частей (стыков трубопроводов, стыков каркасов арматуры и др.) и засверливания сварных швов.

Группа 6 объединяет методы контроля качества сварных конструкций посредством пробной нагрузки, гидравлических и пневматических испытаний. Эти методы применяются при окончательном контроле готовой продукции и являются одним из элементов приемо-сдаточных испытаний.

Сравнение методов контроля

Ввиду того, что каждая группа методов контроля отвечает вполне определенным задачам контроля, сравнение этих групп между собой не имеет смысла. Поэтому в данном параграфе сравниваются способы, объединенные в группу 3, т. е. методы контроля, направленные на выявление наиболее опасных внутренних пороков в сварных швах и соединениях. При сопоставлении этих методов следует учитывать такие важные показатели, как производительность, чувствительность и объективность в оценке качества.

Магнитные методы контроля обладают следующими особенностями:

1) пригодны для контроля только ферромагнитных материалов;

2) позволяют хорошо выявлять пороки, выходящие на поверхность и залегающие вблизи от поверхности. С увеличением глубины залегания порока чувствительность [1] резко снижается. Контроль методом магнитного порошка применим при толщинах 6—7 *мм*; магнитографический способ позволяет выявлять пороки при толщине листов до 12 *мм*; индукционный и электромагнитный способы пригодны при контроле листов до 18—20 *мм*;

3) обладают достаточно высокой производительностью, значительно превосходящей производительность контроля рентгено- и гаммаграфированием, что позволяет осуществлять 100-процентный контроль швов;

4) безвредны для обслуживающего персонала;

К недостаткам магнитных методов контроля относятся:

1) плохая выявляемость одиночных пор и шлаковых включений круглой формы;

2) невозможность установить характер порока;

3) затруднительность выявления мелких внутренних трещин и надрывов;

4) отсутствие возможности контроля немагнитных материалов.

[1] Чувствительность оценивается наименьшей величиной выявляемого порока, выраженной в % от толщины контролируемого металла шва.

Недостатком является и то, что количественная оценка порока зависит от опыта и навыков магнитографов.

Магнитные методы контроля рекомендуется применять в сочетании с методами рентгено- и гаммаграфии по следующей методике: сначала осуществляют 100-процентный контроль швов одним из магнитных способов, а затем просвечивают дефектные участки швов, выявленные магнитным методом.

Ультразвуковой метод контроля получает все большее применение и признание в сварочном производстве. Этот метод обладает целым рядом преимуществ, к числу которых можно отнести:

1) широкий диапазон контролируемых толщин — от 5 до 500 *мм* и выше;

2) возможность контролировать сварные соединения из любых металлов и сплавов;

3) высокая производительность (примерно 10 *см/мин*), что позволяет довольно быстро обеспечить 100-процетный контроль сварных соединений;

4) более высокая чувствительность при выявлении внутренних продольных трещин по сравнению с просвечиванием рентгеновыми и гамма-лучами;

5) портативность и простота оборудования, создающие возможность использовать ультразвуковой метод при контроле на монтаже;

6) безопасность работы для операторов.

К числу недостатков ультразвукового метода относится:

1) трудность установления характера порока (трещина или непровар, шлаковые или газовые включения);

2) требования гладкой поверхности металла контролируемого изделия — отсутствие брызг, ржавчины, вмятин и т. п. — с целью обеспечения хорошего акустического контакта;

3) зависимость оценки качества сварного шва от опыта и квалификации оператора;

4) возможность появления ложных импульсов, вызванных неоднородностью металла сварного соединения, что может привести к неправильному заключению о недоброкачественности сварного соединения.

Ультразвуковой метод контроля сварных швов и соединений наиболее удобен в тех случаях, когда в сварном шве не должно быть пороков.

Кроме того, ультразвуковой метод, как быстрый и легкий, применяется и как предварительный с последующим просвечиванием дефектных участков швов рентгеновыми и гамма-лучами, что влияет на повышение качества сварных конструкций и снижает время контроля по сравнению с рентгено- и гаммаграфированием.

Контроль рентгенографированием и гаммаграфированием является одним из наиболее распро-

страненных методов выявления внутренних пороков в сварных соединениях. Рассматривая этот метод в общем виде, без дифференциации на просвечивание рентгеновыми и гамма-лучами, можно отметить, что основными преимуществами его являются:

1) возможность получить наглядное представление о характере пороков в сварном соединении и об их протяженности;

2) объективность в оценке качества сварки (на основе сравнения с эталонными снимками);

3) высокая чувствительность, позволяющая выявить единичные поры и мелкие трещины, если последние лежат в плоскости, составляющей с направлением потока лучей угол не больше 10°;

4) наличие в результате контроля наглядного документа (рентгеновской пленки), характеризующего качество сварного соединения;

5) возможность надежного контроля в широком диапазоне толщин (от 3 до 250 *мм*, а при использовании бетатрона — 500 *мм* и выше).

Сравнивая методы контроля рентгеновыми лучами и гамма-лучами, необходимо отметить следующее:

1) рентгеновская аппаратура сложна и громоздка, что затрудняет, а часто исключает возможность применения этого метода в труднодоступных местах конструкций и при монтаже. Портативность же препарата гамма-излучения позволяет применять его при контроле труднодоступных мест конструкций, при этом не требуется дополнительных источников энергии;

2) в отличие от направленного пучка рентгеновых лучей рентгеновской трубки, радиоактивные препараты излучают гамма-лучи во все стороны с одинаковой интенсивностью, что позволяет производить за одну экспозицию радиографирование нескольких деталей или полностью кольцевых швов изделий сферической формы, труб и т. п.;

3) проникающая способность гамма-лучей жесткого излучения больше, нежели рентгеновых лучей (кроме более жестких рентгеновых лучей, получаемых от бетатронов), что дает возможность выгодно и надежно контролировать большие толщины металла с лучшими по сравнению с рентгенографированием результатами;

4) наличие радиоактивных изотопов с мягкими излучениями позволяет успешно просвечивать малые толщины металла с такой же чувствительностью, как и рентгеновыми лучами.

Общими недостатками рентгено- и гаммаграфирования являются:

1) низкая по сравнению с другими способами выявления внутренних пороков производительность;

2) большое число факторов, влияющих на чувствительность, о чем подробно говорится в параграфе 12;

3) большая опасность рентгеновых и гамма-лучей для обслуживающего персонала и окружающих;

4) ограниченная возможность выявления трещин и несплавлений — их обнаружение зависит от расположения по отношению к направлению потока лучей.

Рентгенографирование и гаммаграфирование применяются выборочно. В зависимости от типа, назначения и ответственности конструкции ТУ устанавливается протяженность сварных швов, подлежащих контролю, в процентах от их общей длины. Участки, подлежащие такому контролю, могут быть намечены или в результате внешнего осмотра или после проверки ультразвуком.

Применение того или иного метода контроля обусловливается типом сварных конструкций и требованиями, предъявляемыми к ним ТУ, правилами и нормами изготовления. Так например в промышленности по изготовлению котлов и сосудов, работающих под давлением, основными способами контроля являются:

1) выборочное рентгено- и гаммаграфирование продольных и кольцевых швов;

2) 100-процентный контроль продольных и кольцевых швов ультразвуком (особенно толстостенных барабанов котлов высокого давления);

3) испытание гидравлическим давлением;

4) внешний осмотр всех сварных соединений.

Кроме того, для контроля используются: механические испытания образцов, изготовленных из контрольных пластин, металлографические исследования и иногда засверливание угловых швов.

В судостроительной промышленности широко применяют такие способы контроля, как:

1) внешний осмотр и обмер элементов конструкции в процессе их заготовки, подготовки под сварку, сборки и сварки, а также готовых секций и блоков после их сварки;

2) выборочное рентгено- и гаммаграфирование ответственных швов судовых корпусов;

3) 100-процентный контроль стыковых соединений магнитным методом (с применением специальной аппаратуры) или ультразвуком;

4) испытание на непроницаемость керосином, гелиевым течеискателем, наливом воды в отсеки или струей воды отдельных сварных соединений, заполнением воздухом газонепроницаемых отсеков или же испытание воздушной струей под давлением;

5) засверливание угловых швов.

В производстве мостовых конструкций широко используют:

1) 100-процентный контроль ультразвуком стыковых и угловых швов с полным технологическим проваром (фиг. 13);

2) выборочное рентгенографирование сварных элементов мостов, изготовляемых в условиях цеха, и гаммаграфирование при монтаже;

3) испытание методом пробных нагрузок;

4) внешний осмотр и обмер элементов конструкции в процессе изготовления и готовой конструкции в целом;

5) механические испытания и металлографические исследования образцов.

При строительстве нефтегазопроводов и нефтерезервуаров чаще всего применяют:

1) выборочное гаммаграфирование стыковых соединений труб;

2) проверку герметичности сварных соединений нефтерезервуаров вакуум-камерами или керосином;

3) магнитную дефектоскопию (в частности магнитографический метод) для контроля стыков труб и стыковых сварных соединений нефтерезервуаров при толщине материала до 12 *мм*;

4) пневматические испытания герметичности нефтегазопроводов;

5) механические испытания и металлографические исследования контрольных стыков труб.

Таким образом, в зависимости от типа конструкций, условий их производства (в цехе или на монтаже) и технических условий изготовления устанавливают различные методы контроля. При этом никогда не следует забывать, что объем контрольных работ на предприятии может оказаться излишне большим и дублирование различных методов (иногда очень дорогих) может привести к созданию громоздкого контрольного аппарата, что отрицательно отразится на показателях производительности труда и себестоимости изготовляемой продукции. Поэтому при организации контроля определяют наиболее экономичный в каждом отдельном случае метод его осуществления.

ГЛАВА III

СПОСОБЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАЗЛИЧНЫХ СВОЙСТВ МЕТАЛЛОВ И СПЛАВОВ

7. ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ОСНОВНОГО И НАПЛАВЛЕННОГО МЕТАЛЛА И СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Механические испытания металлов и сплавов производятся для того, чтобы определить механическую прочность основного и наплавленного металла, а также прочность сварного соединения и механические свойства зоны термического воздействия.

Критерием механической прочности является способность металла, сварного соединения или конструкции в целом сопротивляться механическому разрушению или выдерживать деформации без разрушения. Прочность металлов определяется теми характеристиками механических свойств, которые получаются при механических испытаниях.

Широкое применение сварки во всех отраслях народного хозяйства приводит к тому, что в процессе эксплуатации сварные конструкции работают в условиях самых различных нагрузок (статической, динамической и др.) и окружающих температур (нормальной, отрицательной и высокой). В соответствии с этим применяются разнообразные способы определения механических свойств. К ним следует отнести:

1) статические испытания на растяжение и изгиб для определения предела прочности и пластичности металла;

2) динамические испытания для определения ударной вязкости металла и его склонности к хрупкому разрушению;

3) повторно-переменные испытания для определения выносливости или усталостной прочности сварных соединений;

4) испытания на ползучесть металла при высоких температурах (до 1000° С и выше) для определения прочности или так называемой жаропрочности металла — способности сопротивляться разрушениям при высоких температурах;

5) испытание твердости и микротвердости наплавленного металла и различных участков зоны термического воздействия в сварном соединении для определения сопротивления металла деформации на поверхности испытуемого образца или изделия.

Статические испытания на растяжение

При испытаниях основного и наплавленного металла, а также сварных соединений на растяжение определяют следующие основные механические характеристики.

Предел прочности (условный) представляет собой напряжение, отвечающее наибольшей нагрузке $P_в$, предшествующей разрушению образца. Вычисляется по формуле

$$\sigma_в = \frac{P_в}{F_0} \; кГ/мм^2,$$

где $P_в$ — нагрузка, соответствующая напряжению $\sigma_в$ в $кГ$;

F_0 — первоначальная площадь поперечного сечения образца в $мм^2$.

В действительности напряжение растяжения несколько больше величины $\sigma_в$, вычисленной по приведенной формуле, так как площадь сечения для данного состояния образца вследствие растяжения меньше первоначальной площади сечения F_0.

Действительное напряжение после разрыва образца подсчитывается по формуле

$$\sigma_к = \frac{P_к}{F_к} \; кГ/мм^2,$$

где $P_к$ — разрывное усилие в $кГ$;

$F_к$ — наименьшее сечение образца в месте разрыва;

$\sigma_к$ — сопротивление разрыву в шейке образца, т. е. наибольшее напряжение, какое выдерживает образец, не разрушаясь во время испытания. Это напряжение называется истинным напряжением, или *истинным пределом прочности при растяжении.*

Относительное удлинение (условная относительная деформация) образца определяется как отношение абсолютного остаточного удлинения к первоначальной расчетной длине образца и выражается формулой

$$\delta = \frac{\Delta l_к}{l_0} 100\% = \frac{l_к - l_0}{l_0} 100\%.$$

Для определения длины $l_к$ обе части образца после разрыва прикладывают один к другому возможно плотнее и измеряют.

Относительное удлинение характеризует пластичность металла.

Относительное сужение (условное) площади сечения образца после разрыва определяется как отношение величины уменьшения площади поперечного сечения в месте наибольшего сужения шейки к первоначальной площади сечения образца и выражается формулой

$$\psi_к = \frac{F_0 - F_к}{F_0} 100\%,$$

где F_0 — начальное поперечное сечение образца;

$F_к$ — конечное наименьшее поперечное сечение образца.

Для определения величины $F_к$ обе части образца после разрыва плотно прикладывают друг к другу и измеряют диаметры шейки в двух взаимно перпендикулярных направлениях. По среднему арифметическому значению $d_{ср}$ измеренных величин вычисляют площадь

$$F_к = \frac{\pi d_{ср}^2}{4} \text{ мм}^2.$$

На практике часто определяют $\psi_к$ по наименьшему размеру диаметра шейки после разрыва по формуле

$$\psi_к = \frac{d_0^2 - d_1^2}{d_0^2} 100\%,$$

где d_0 — начальный диаметр образца;

d_1 — наименьший диаметр образца в шейке после разрыва.

Относительное сужение характеризует пластичность металла в условиях напряженного состояния в шейке и считается наиболее простой и существенной характеристикой при статическом растяжении.

Предел текучести (физический) — такое состояние напряжения материала, при котором образец деформируется без заметного увеличения нагрузки.

Предел текучести вычисляется по формуле

$$\sigma_T = \frac{P_T}{F_0} \text{ кГ/мм}^2,$$

где P_T — нагрузка, соответствующая напряжению σ_T в кГ;

F_0 — первоначальная площадь поперечного сечения образца в мм².

Предел текучести (физический) определяют при растяжении образца на машине непрерывно и плавно возрастающей нагрузкой.

Стали крупнозернистые, а также с повышенным содержанием углерода и большинство легированных сталей после закалки и отпуска не обладают ясно выраженным свойством текучести. Для таких материалов определяется условный предел текучести.

Под условным пределом текучести понимают напряжение, при котором образец получает остаточную деформацию, равную 0,2% первоначальной расчетной длины.

Величину $\sigma_{0,2}$ определяют по формуле

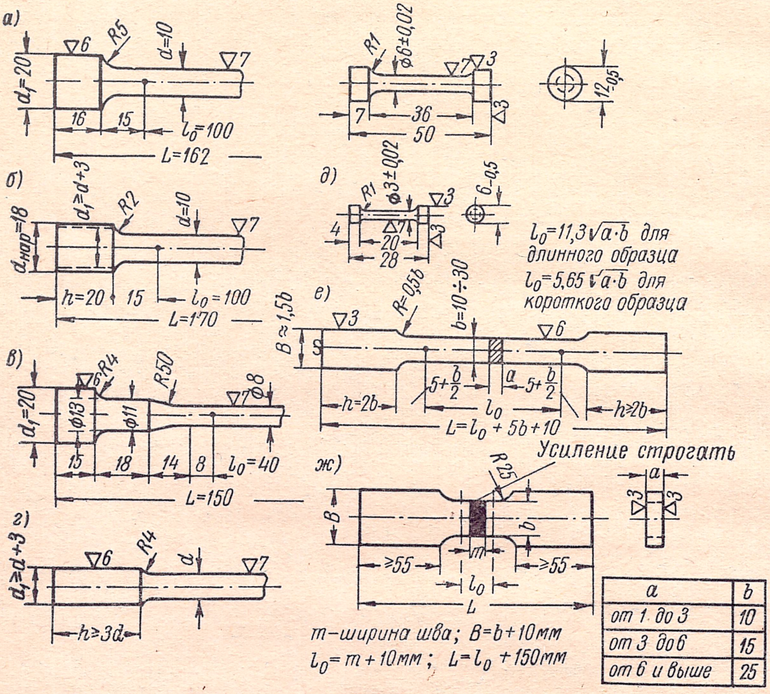
$$\sigma_{0,2} = \frac{P_{0,2}}{F_0} \text{ кГ/мм}^2.$$

Предел текучести характеризует сопротивление металла малым пластическим деформациям.

Испытанию на растяжение подвергаются образцы из основного и наплавленного металла, а также образцы, сваренные в стык.

Для испытания основного металла изготовляют цилиндрические или плоские образцы, применяемые размеры и форма которых указаны на фиг. 15 по ГОСТ 1497—42.

Для испытания наплавленного металла при температуре от 10 до 30° или при температуре ниже нуля применяются цилиндрические образцы в соответствии с фиг. 16 *а,б*.



a	b
от 1 до 3	10
от 3 до 6	15
от 6 и выше	25

Фиг. 15. Форма и размеры образцов, применяемых для испытаний на растяжение: *а* — металлов достаточно пластичных; *б* — образцов, требующих тщательного центрирования; *в* — малопластичной стали; *г* — крепления клиновыми захватами при пластичных материалах; *д* — на прессе Гагарина или на машине ИМ-4Р; *е* — листового металла толщиной до 25 *мм*; *ж* — сварных соединений в стык при снятом усилении.

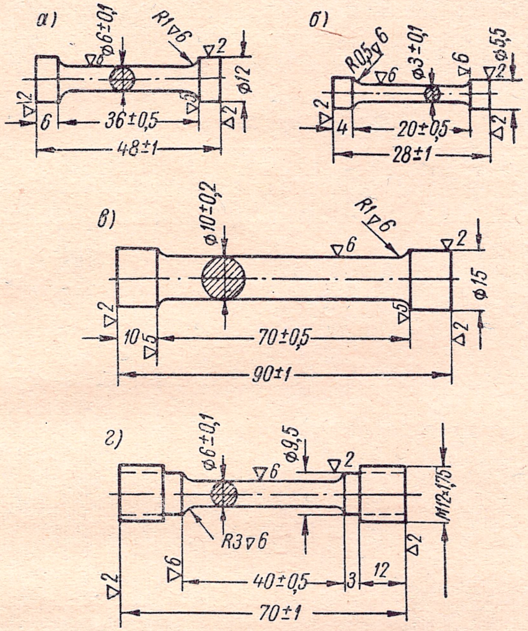
При испытании наплавленного металла одностороннего стыкового шва при толщине листов более 20 *мм* и двустороннего при толщине листов более 40 *мм* допускается также применение образцов по фиг. 16, *в*.

Сечение образцов в рабочей части должно полностью состоять из металла шва.

Для испытания наплавленного металла при температуре выше 30° применяются образцы по фиг. 16, *г*.

Испытанию подвергают не менее двух образцов.

Для испытания сварного соединения применяют плоские и цилиндрические образцы, форма и размеры которых приведены на фиг. 17 и в табл. 1.



Фиг. 16. Образцы для испытания наплавленного металла на растяжение при расчетных длинах: *а* — 30 *мм*; *б* — 15 *мм*; *в* — 50 *мм*; *г* — 30 *мм*.

Таблица 1

Размеры образцов в *мм*

Толщина металла	Плоские образцы			Цилиндрические образцы	
	b	b_1	l	d	l
До 4,5	15	25	50	До 10	60
4,5—10	20	30	60	10—25	100
10—25	25	35	100	25—50	160
25—50	30	40	160		

Примечания.

1. Длина захватной части h образца устанавливается в зависимости от конструкции испытательной машины.

2. Размеры плоского образца при толщине металла более 50 *мм* и круглого при диаметре стержня более 50 *мм* определяются техническими условиями.

При контроле прочности сварных соединений труб со стенкой толщиной до 6 *мм* включительно, сваренных в стык, применяются образцы по фиг. 18 *а*, сваренных внахлестку — по фиг. 18, *б*.

Прочность сварного шва определяется на образцах (фиг. 19) со снятым усилением шва и с закругленными кромками радиусом не более 1 *мм*. Размеры образцов приведены в табл. 2.

Таблица 2

Размеры образцов в *мм*

Толщина металла S	b_1	$b \pm 0{,}5$	R	l
До 4,5	25	15	7—9	40
4,5—10	30	20	14—16	60
10—25	38	25	19—21	70

Примечание. Длина $L = l + 2h$, где h зависит от конструкции испытательной машины.

Предел прочности образца

$$\sigma_в = K \frac{P}{F} \text{ кГ/мм}^2,$$

где K — поправочный коэффициент; для конструкционных и низколегированных сталей принимается равным 0,9, а для других материалов устанавливается техническими условиями.

Если прочность металла шва меньше прочности основного металла и зоны термического воздействия, образцы делаются без выточки по радиусу R и при определении $\sigma_в$ коэффициент K в формулу не вводится.

Сварные соединения, выполненные точечной контактной сваркой и электрозаклепками, испытываются на срез путем растяжения образца по фиг. 20. Испытанию подвергают не менее 10 образцов.

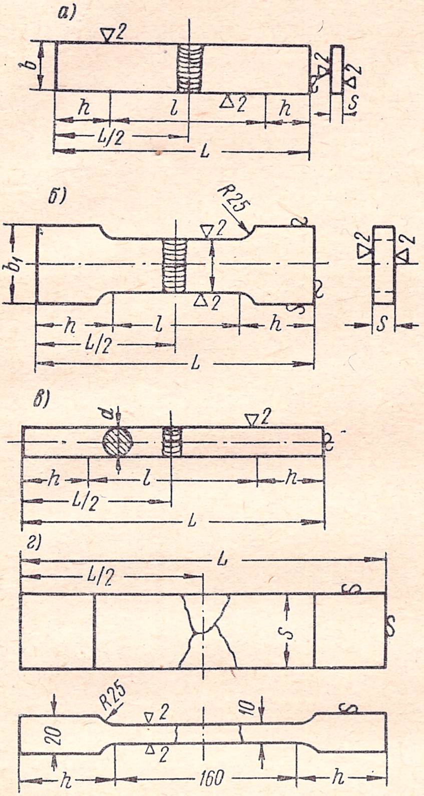
Размеры образцов в *мм*

S	до 1	1,1—2	2—3	3
b	20	25	30	40

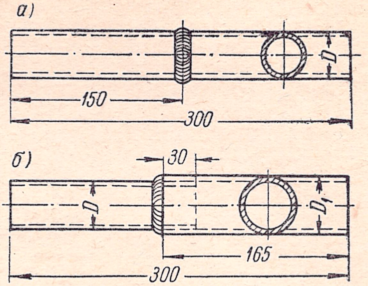
Ширина образца, сваренного при помощи электрозаклепок, во всех случаях должна быть равна 40 *мм*.

При испытании определяют разрушающее усилие на точку в *кГ*.

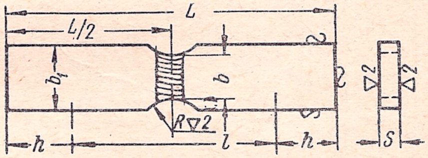
Соединения листов, сваренных роликовой контактной сваркой, испытываются растяжением образцов, представленных на фиг. 21, *а*, *б*, где S — толщина металла в *мм*. Испытанию подвергают не менее 10 образцов.



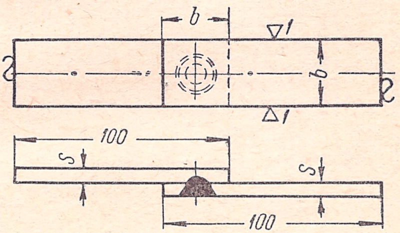
Фиг. 17. Образцы для испытания сварных соединений на растяжение: *а*, *б* — плоские образцы; *в* — цилиндрический образец; *г* — плоский образец уменьшенной толщины.



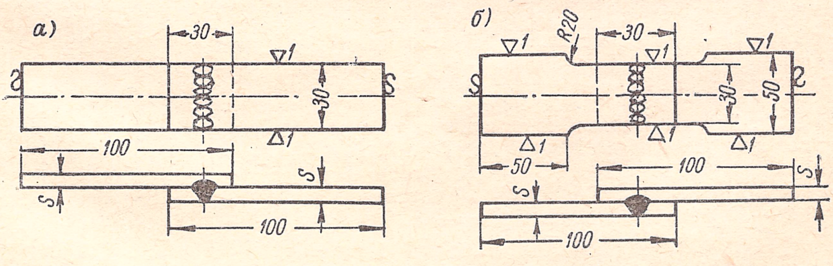
Фиг. 18. Образцы для определения прочности сварных соединений труб: *а* — сварка в стык; *б* — сварка внахлестку.



Фиг. 19. Образец для определения прочности сварного шва.



Фиг. 20. Образцы для испытания прочности точечных и электрозаклепочных сварных соединений.



Фиг. 21. Образцы для испытания сварных соединений, выполненных роликовой сваркой: *а* — прямоугольный; *б* — с выточкой.

Динамические испытания на удар

При динамических испытаниях на удар определяется способность материала сопротивляться динамическим нагрузкам и его склонность к хрупкому разрушению, которая повышается при наличии на образце надреза, пониженной температуре испытания и с увеличением скорости нагружения.

Ударные испытания производятся на растяжение и на изгиб, но наибольшее распространение получили испытания на ударный изгиб образцов с надрезом, так называемые испытания на ударную вязкость.

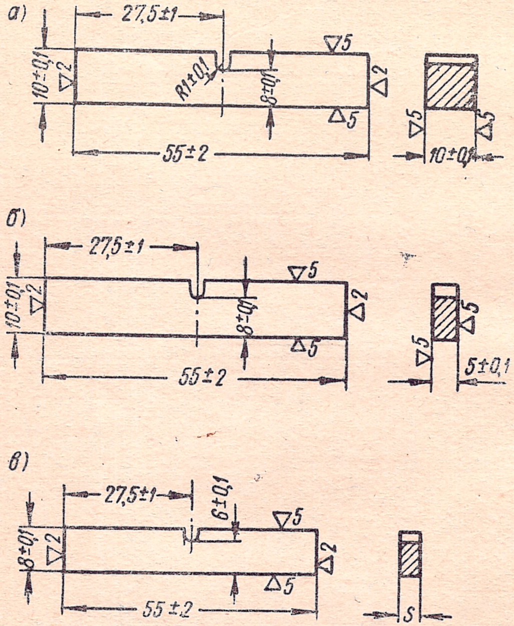
Испытания на ударный изгиб

Испытания производятся на маятниковых копрах с различной предельной энергией, позволяющих измерять работу удара с точностью до 0,1 *кГм*. Запас энергии копра должен обеспечивать скорость в момент удара в пределах 4—7 *м/сек*.

Испытанию подвергают: основной металл при нормальной температуре по ГОСТ 9454—60 при пониженных температурах по ГОСТ 9455—60, при повышенных температурах по ГОСТ 9456—60; металл шва и металл зоны термического влияния по ГОСТ 6996—54.

Для испытания в соответствии с указанными ГОСТ изготовляют образцы с надрезом, форма и размер которых по ГОСТ 6996—54 приведены на фиг. 22.

В зависимости от цели испытания сварного соединения надрез в образце располагается по оси шва, по линии сплавления или по зоне термического воздействия. Место надреза и расстояние от его середины для случая надреза в зоне термического воздействия оговариваются техническими условиями.

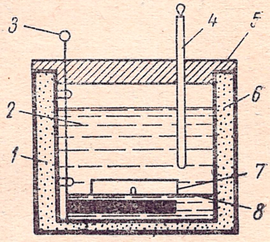


Фиг. 22. Типы образцов для испытания металла шва и зоны термического воздействия стыковых соединений на ударный изгиб: *а* — толщиной 10 *мм* и более; *б* — толщиной 5—10 *мм*; *в* — толщиной 2—5 *мм*.

Надрез на образцах из сварного соединения производится со стороны раскрытия шва. В случае изготовления образца из наплавленного металла надрез производится с любой стороны образца.

Образцы испытывают при нормальной температуре (15—25° С), а также при высоких и низких температурах с целью определения температурного интервала перехода металла из вязкого состояния в хрупкое. Испытуемые (стандартные) образцы предварительно нагревают или охлаждают до заданной температуры.

Охлаждение образцов производится в ваннах с незамерзающей жидкостью (например, бензин), охлажденной до заданной температуры испытания при помощи твердой углекислоты (до —60° С) или жидкого азота (от —60° до —100° С). Схема ванны изображена на фиг. 23.



Фиг. 23. Схема ванны для охлаждения образцов при испытании на ударную вязкость:

1 — теплоизоляция; 2 — незамерзающая жидкость; 3 — мешалка; 4 — термометр; 5 — крышка; 6 — металлическая ванна с двойными стенками; 7 — образец; 8 — решетка.

Образец выдерживают в ванне при заданной температуре не менее 15 мин.

Время установки охлажденного образца на копер с момента извлечения из ванны до удара маятника копра не должно превышать 5—7 сек.

Испытания на ударный изгиб при повышенных температурах производятся на образцах, нагреваемых в муфельных или тигельных электропечах на 10—20° выше температуры испытания. Образцы выдерживаются в печи в течение 20—30 мин.

Наиболее распространен маятниковый копер типа Шарпи (фиг. 24) на 10—30 *кГм*.

Испытание проводится в следующем порядке.

Образец устанавливают на две опоры копра так, чтобы нож маятника приходился против надреза с противоположной стороны. Расстояние между опорами должно быть 40 *мм* (±0,5 *мм*).

Маятник отводится на угол α в положение *I* и закрепляется защелкой. Стрелка, с легким трением насаженная на ось вращения маятника, устанавливается перед испытанием на нуль шкалы. После спуска защелки диск маятника падает на некоторый угол β, отсчитываемый по положению стрелки на шкале, когда маятник занял положение *III*, в положение *II*.

Работу $A_н$ разрушения образца определяют по формуле

$$A_н = P(H - h) = Pl(\cos\beta - \cos\alpha) \ кГм,$$

где P — вес маятника в *кГ*;

l — расстояние от центра тяжести маятника до оси качания (длина маятника) в *м*;

H и h — соответственно высоты подъема маятника до и после удара в *м*;

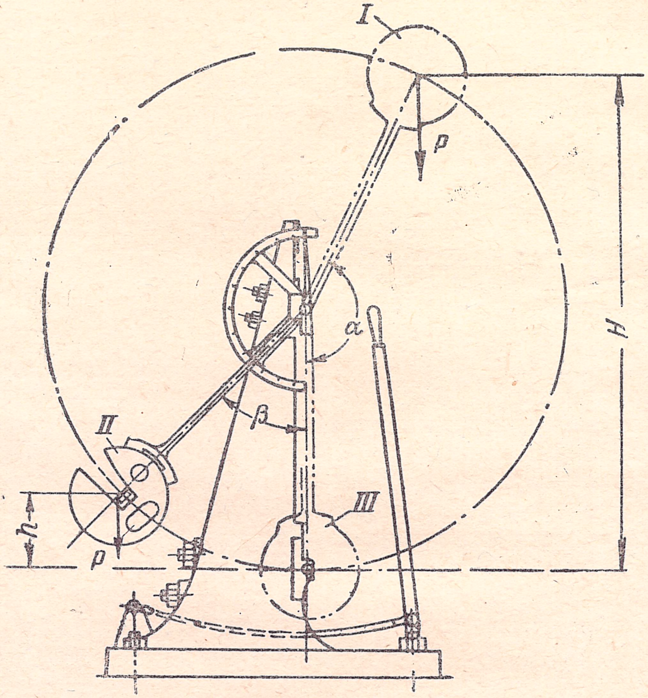
α и β — соответствующие подъемам углы отклонения маятника.

Ударная вязкость $a_н$ определяется по формуле

$$a_н = \frac{A_н}{F} \ кГм/см^2;$$

где F — площадь поперечного сечения образца в месте надреза до испытания в $см^2$.

Вычисление $a_н$ производят с округлением до 0,1 $кГм/см^2$.



Фиг. 24. Схема маятникового копра типа Шарпи для испытания металла на ударный изгиб.

Испытание на ударный разрыв

Испытанию на ударный разрыв подвергаются сварные стыковые соединения из листового материала толщиной до 2,5 *мм*.

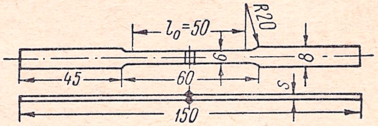
Образцы вырезают по форме и размерам, указанным на фиг. 25, и испытывают на маятниковых копрах с запасом работы 15—30 *кГм*. Копры имеют приспособления для закрепления плоских образцов.

Сопротивление ударному разрыву условно определяется по формуле

$$a_y = \frac{A_y}{V} \ кГм/см^3,$$

где $A_у$ — работа удара, затраченная на разрушение образца в *кГм*;

V — объем расчетной части образца в *см*^{3}; $V = S\, l_0 b$, где S — толщина; l_0 — расчетная длина; b — ширина образца.



Фиг. 25. Образец для испытания на ударный разрыв.

Оценка результатов испытания сварного соединения может производиться как по абсолютному значению его сопротивления ударному разрыву, так и по отношению этого сопротивления к сопротивлению ударному разрыву основного металла. Нормы для этого испытания устанавливаются соответствующими техническими условиями или инструкциями.

Испытание на выносливость (усталость)

Под усталостью металла понимают процесс постепенного его разрушения под действием многократных повторно-переменных напряжений.

Наибольшее напряжение, при котором образец выдерживает без разрушения заданное число циклов, принимаемое за базу испытания, называют пределом выносливости (усталости). База испытаний устанавливается в зависимости от служебного назначения металла сварного соединения.

Однократное изменение напряжений от наибольшего до наименьшего значений и обратно называют циклом напряжений.

Цикл называется симметричным, когда его верхнее и нижнее предельные значения напряжений одинаковы по величине, но противоположны по знаку, и несимметричным, когда предельные значения напряжений неодинаковы по величине (фиг. 26).

Полуразность предельных значений напряжений (наибольшего σ_{max} и наименьшего σ_{min}) цикла называется амплитудой цикла,

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2}\,.$$

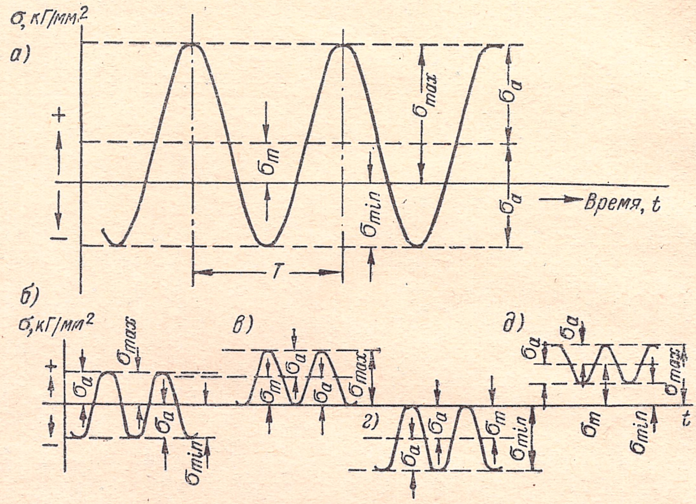
Полусумма предельных значений называется средним, или постоянным, напряжением σ_m цикла

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}\,.$$

Отношение наименьшего напряжения к наибольшему (по их абсолютным величинам), взятое с алгебраическим знаком, называется коэффициентом K амплитуды цикла,

$$K = \frac{\sigma_{min}}{\sigma_{max}}$$

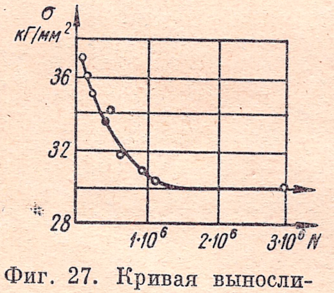
Критерием усталостной прочности при испытании служит число циклов нагружения до разрушения образца и предел выносливости.



Фиг. 26. Циклы нагружений при испытаниях на выносливость: *а* — знакопеременный несимметричный цикл; *б* — знакопеременный симметричный цикл; *в* — знакопостоянный положительный отнулевой несимметричный цикл; *г* — знакопостоянный отрицательный отнулевой несимметричный цикл; *д* — знакопостоянный пульсирующий цикл растяжения.

Для определения предела выносливости по ГОСТ 2860—45 подвергают испытанию не менее шести образцов.

Первый образец испытывают при напряжении, равном для сталей $\sigma_{max} \approx 0{,}6\ \sigma_в$, а для легких сплавов $\sigma_{max} \approx 0{,}46\ \sigma_в$, где $\sigma_в$ — предел прочности при растяжении. Для остальных образцов напряжение каждый раз снижают или повышают на 2 или 4 *кГ/мм²* в зависимости от числа циклов, вызвавших разрушение первого образца, пока разность между напряжениями для последних двух образцов (разрушенного и неразрушенного при числе циклов, равном базе) не станет меньше 2 *кГ/мм²*.



Фиг. 27. Кривая выносливости.

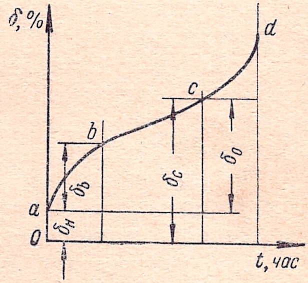
Предел выносливости стальных образцов определяют на базе $5 \cdot 10^6$ циклов, а образцов из легких литейных сплавов — на базе $20 \cdot 10^6$ циклов. По результатам испытаний строят диаграмму в прямоугольных координатах (фиг. 27), откладывая по оси ординат напряжения σ в *кГ/мм²*, а по оси абсцисс — числа циклов *N* в пропорциональных или логарифмических масштабах.

Испытание на ползучесть

Ползучесть — свойство металлов и сплавов медленно и непрерывно пластически деформироваться под действием постоянной нагрузки при напряжениях ниже предела упругости для данного металла.

Обычно определяют условный предел ползучести, т. е. ту величину наибольшего длительно приложенного напряжения, при котором материал при данной температуре за определенный период времени обнаруживает заданное суммарное удлинение образца (например, 1% за 1000, 10 000, 100 000 час.) или заданную скорость ползучести (соответственно 10^{-3}, 10^{-4}, 10^{-5} % в час).

На фиг. 28 показана диаграмма, получаемая при испытании образца на ползучесть в координатах: относительное удлинение δ, время t.



Фиг. 28. Кривая испытания образца на ползучесть.

В момент нагружения в образце возникает упругая деформация $\delta_н$, обозначенная на кривой (фиг. 28) участком $0a$. Затем начинается первый этап испытания — образование остаточной пластической деформации $\delta_в$ с большой, но постепенно затухающей скоростью (отрезок ab на фиг. 28). За первым этапом испытания следует второй этап — участок условно равномерной скорости деформации (отрезок bc кривой). Третий этап — участок возрастающей скорости ползучести (отрезок cd) — заканчивается разрушением образца.

Для определения предела ползучести ограничиваются первым и вторым этапами, т. е. получением участков диаграммы начального криволинейного ab и следующего за ним условно прямолинейного участка bc длительной деформации со сравнительно низкими скоростями ползучести, на котором можно измерить с достаточной точностью величину деформации δ_c, т. е. суммарное удлинение (упругое $\delta_н$ + остаточное δ_o) в процентах за время испытания.

Скорость ползучести определяется по формуле

$$v_{пл} = \frac{\delta_c - \delta_в}{t_c - t_в} \ мм/час,$$

где δ_c — суммарное удлинение в *мм*;

$\delta_в$ — остаточная пластическая деформация в *мм*;

t_c — время, в течение которого получено суммарное удлинение, в час;

$t_в$ — время, в течение которого получена остаточная пластическая деформация, в час.

Длительность испытания на ползучесть по ГОСТ 3248—60 устанавливается 100, 300, 500 или 1000 час. и выше в зависимости от хода кривой.

В случае определения предела ползучести по скорости ползучести продолжительность испытания должна составлять не менее 2000—3000 час. при условии продолжительности прямолинейного участка кривой ползучести не менее 500 час.

Испытания проводят в следующем порядке.

Нагретый до заданной температуры образец выдерживают при этой температуре в течение не менее 1 часа, после чего к образцу плавно прикладывают предварительную нагрузку, равную около 10% заданной общей нагрузки и не вызывающую в образце напряжение более 1 *кГ/мм*².

При помощи специального прибора измеряют удлинения с точностью не менее 0,002 *мм*.

Если удлинения остаются в течение 5 мин. неизмененными, то плавно нагружают образец до заданной нагрузки и замеряют удлинение через интервалы, позволяющие установить характер изменения удлинений.

По окончании испытания образец разгружают до величины предварительной нагрузки и определяют абсолютную величину остаточного удлинения.

Для определения условного предела ползучести испытывают не менее четырех образцов при данной температуре и разных напряжениях. На основе полученных первичных кривых ползучести строят диаграммы зависимости между напряжением и суммарным удлинением или между напряжением и средней равномерной скоростью удлинения на прямолинейном участке кривой и по ним находят интерполированием искомое напряжение, которое вызывает при данной температуре за определенный промежуток времени заданную скорость или заданную суммарную деформацию.

Для испытания используют следующие основные типы стандартных образцов в соответствии с ГОСТ 3248—60:

1) цилиндрический, диаметром 10 *мм* с расчетной длиной 100 *мм* (нормальный образец) и с расчетной длиной 200 *мм* (удлиненный образец);

2) плоский, шириной 15 *мм* с расчетной длиной 100 *мм*.

Толщина образца определяется толщиной листа.

Определение твердости

Твердость — это способность металла сопротивляться деформации на поверхности образца или изделия при воздействии на него более твердого тела заданной формы и размера.

Твердость определяют для наплавленного металла, основного металла и зоны термического воздействия. Образцы для испытания вырезаются так, чтобы в них имелись все участки сварного

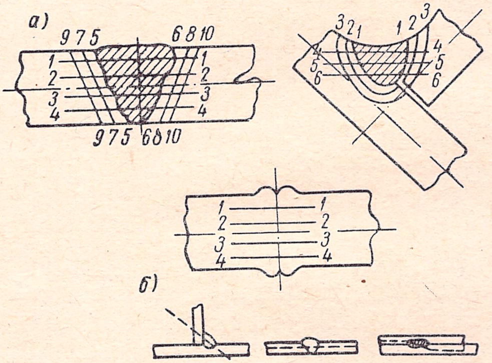
соединения. Твердость измеряют в поперечном сечении образца (по три измерения для каждого участка).

Для стыковых соединений листов толщиной до 3 *мм* твердость может замеряться на наружной поверхности при снятом усилении шва.

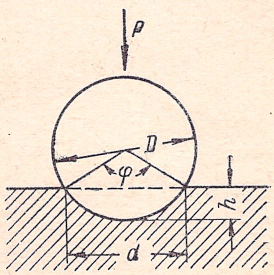
Схемы приемов измерения твердости показаны на фиг. 29.

Стандартными являются три способа определения твердости металла:

1) вдавливанием стального закаленного шарика (способ Бринелля);



Фиг. 29. Схемы измерения твердости для сварных соединений: *а* — для толстого металла; *б* — для металла малых толщин.



Фиг. 30. Схема испытания твердости вдавливанием стального шарика.

2) вдавливанием стального шарика или алмазного конуса (способ Роквелла);

3) вдавливанием алмазной пирамиды (способ Викерса).

Определение твердости металла по способу Бринелля заключается в следующем.

В испытуемую металлическую поверхность (фиг. 30) под определенной нагрузкой P вдавливается стандартный стальной закаленный шарик диаметром D, и по величине диаметра полученного отпечатка d судят о твердости металла.

Число твердости определяется отношением нагрузки P к шаровой поверхности отпечатка F.

Зная диаметр шарика D в *мм* и нагрузку P в *кГ* и измерив после снятия нагрузки диаметр отпечатка d в *мм*, можно определить твердость, пользуясь формулой

$$HB = \frac{P}{F} = \frac{P}{\frac{\pi D^2}{2} - \frac{\pi D}{2}\sqrt{D^2 - d^2}}.$$

При определении твердости обычно пользуются таблицей значений HB, вычисленных для различной величины отпечатков,

полученных вдавливанием шарика $D = 10$ *мм* под нагрузками 3000, 1000 и 250 *кГ*.

Толщина образца должна быть не менее 10-кратной глубины отпечатка h.

Расстояние от центра отпечатка до края образца должно быть не менее чем 2,5 d, а до центра соседнего отпечатка — не менее 4 d.

Твердость *НВ* определяют как среднее значение, полученное при двух испытаниях одного и того же образца, причем диаметр каждого отпечатка находят как среднее значение из измерений по двум перпендикулярным направлениям. Разность измерений диаметров одного отпечатка не должна превышать 2% от меньшего из них.

Для получения сравниваемых результатов определения при различных диаметрах шариков и различных нагрузках необходимо соблюдать закон подобия

$$\frac{P}{D^2} = \text{const}.$$

В этом случае угол $\varphi = \text{const}$, где φ — угол вдавливания (фиг. 30).

Для соблюдения закона подобия ГОСТ 9012—59 установил соотношения между нагрузкой P и диаметром шарика D в зависимости от твердости и толщины испытуемого образца (табл. 3).

Диаметры полученных при испытании отпечатков должны находиться в пределах $0{,}2\,D < d < 0{,}6\,D$. Если отпечаток d получается меньшего размера, нужно перейти к группе с большей величиной P, и наоборот.

Определение твердости по способу Роквелла производят вдавливанием в образец наконечника стандартного типа алмазного конуса с углом при вершине 120° или стального закаленного шарика диаметром $1{,}588 \pm 0{,}001$ *мм* (1/16″) под действием двух последовательно прилагаемых нагрузок: предварительной 10 *кГ* и общей (предварительной и основной) 60, 100 или 150 *кГ*. Предварительная нагрузка 10 *кГ* обеспечивает плотность соприкосновения алмаза или шарика с образцом во избежание ошибок, вызываемых различной чистотой обработки поверхности испытываемых образцов.

Алмазный конус применяется для испытания твердых металлов, и величина твердости определяется по шкале C и A прибора, а стальной шарик — для испытания более мягких металлов, и твердость определяются по шкале B.

Пределы измерения твердости по указанным шкалам, установленные ГОСТ 9013—59, приведены в табл. 4.

Толщина изделия под отпечатком должна быть не менее 8-кратной глубины вдавливания h, подсчитываемой по формулам

$$h = 0{,}002\,(130 - HRB)$$

и

$$h = 0{,}002\,(100 - HRC).$$

Таблица 3

Условия измерения твердости по Бринеллю

Материал	Твердость по Бринеллю	Минимальная толщина испытуемого образца в *мм*	Соотношение между нагрузкой *P* и диаметром шарика *D*	Диаметр шарика *D* в *мм*	Нагрузка *P* в *кГ*	Выдержка под нагрузкой в сек.
Черные металлы	140—450	От 6 до 3 » 4 » 2 Менее 2	$P = 30\,D^2$	10,0 5,0 2,5	3000 750 187,5	10
	Менее 140	Более 6 От 6 до 3 Менее 3	$P = 10\,D^2$	10,0 5,0 2,5	1000 250 62,5	10
Цветные металлы	Более 130	От 6 до 3 » 4 » 2 Менее 2	$P = 30\,D^2$	10,0 5,0 2,5	3000 750 187,5	30
	35—130	От 9 до 3 » 6 » 3 Менее 3	$P = 10\,D^2$	10,0 5,0 2,5	1000 250 62,5	30
	8—35	Более 6 От 6 до 3 Менее 3	$P = 2{,}5\,D^2$	10,0 5,0 2,5	250 62,5 15,6	60

Таблица 4

Пределы измерения твердости по различным шкалам

Обозначения		Нагрузка в *кГ*	Примерная твердость по Бринеллю *HB*	Пределы измерения в единицах твердости по Роквеллу *HR*	Соответствующие приближенные значения чисел твердости, измеренных алмазной пирамидой по Викерсу *HV*
шкалы	чисел твердости				
B	*HB*	100	60—230	25—100	60—240
C	*HC*	150	230—700	20—67	240—900
A	*HA*	60	700	70—85	390—900

Расстояние между центрами отпечатков и от центра до края образца при определении твердости должно быть не менее 3 *мм*.

Твердость по Роквеллу измеряется по шкалам *A*, *B*, *C* в условных единицах. Измерение твердости по шкалам *A* и *C* производится путем вдавливания в испытуемый образец алмазного

конического наконечника, а по шкале B — путем вдавливания стального шарика. За единицу твердости принята величина, соответствующая осевому перемещению наконечника на 0,002 *мм*.

Числа твердости HR выражаются формулами:

при измерении по шкалам A и C

$$HR = 100 - e,$$

при измерении по шкале B

$$HR = 130 - e.$$

Величина e определяется по следующей формуле:

$$e = \frac{h_1 - h_0}{0{,}002},$$

где h_0 — глубина внедрения наконечника в испытуемый образец под действием предварительной нагрузки;

h_1 — глубина внедрения наконечника в испытуемый образец под действием общей нагрузки, измеренная после снятия основной нагрузки и оставления предварительной нагрузки 10 *кГ*.

Определение твердости по способу Виккерса производится вдавливанием статической нагрузкой в поверхность металла четырехгранной алмазной пирамиды с квадратным основанием и углом между противоположными гранями 136°.

Число твердости определяется как среднее давление в *кГ* на 1 *мм*² площади отпечатка.

$$HV = \frac{P}{F} = \frac{2P \sin \frac{\alpha}{2}}{d^2} = 1{,}8544 \frac{P}{d^2} \text{ кГ/мм}^2,$$

где P — нагрузка на пирамиду в *кГ*;

α — угол между противоположными гранями пирамиды ($\alpha = 136°$);

d — среднее арифметическое длин обеих диагоналей отпечатка в *мм* после снятия нагрузки.

Для облегчения расчетов пользуются таблицами чисел твердости, составленными по приведенной выше формуле для различных нагрузок.

Для испытаний применяется одна из следующих нагрузок: 5; 10; 20; 30; 50; 100 *кГ*. С увеличением нагрузки повышается точность результата измерений. Нагрузка должна быть такой, чтобы толщина образца в месте измерения была для стальных изделий в 1,2 раза, а для цветных металлов в 1,5 раза больше диагонали отпечатка и чтобы на обратной стороне образца нельзя было обнаружить места испытания.

Глубина вдавливания в этом случае выражается равенством

$$h = \frac{d}{2\sqrt{2\,\mathrm{tg}\,\frac{\alpha}{2}}} = \frac{1}{7}d,$$

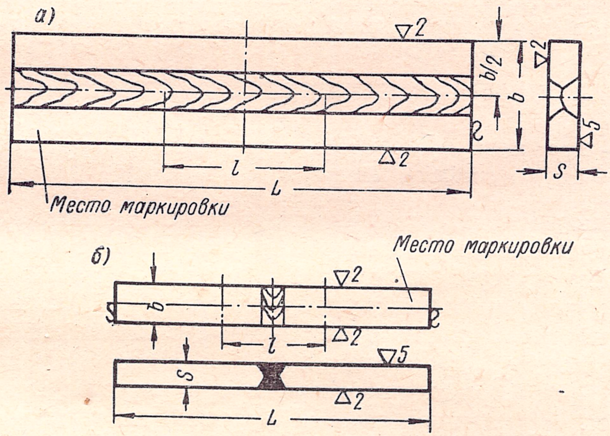
где d — длина диагонали отпечатка после снятия нагрузки P на наконечник.

Испытания производятся при температуре $20 \pm 10°$ С.

Нагружать образец следует плавно, без толчков и ударов, выдержка под нагрузкой должна быть 10—15 сек. для черных металлов и 30 ± 2 сек. для цветных. Между центром отпечатка и краем образца или краем смежного отпечатка должно быть не менее 2,5 длины диагонали отпечатка.

Испытание на загиб

Испытанию на загиб подвергают стыковые сварные соединения из листового материала с целью определения пластичности металла сварных швов и околошовной зоны при статической нагрузке.



Фиг. 31. Образцы сварных соединений для испытания на загиб.

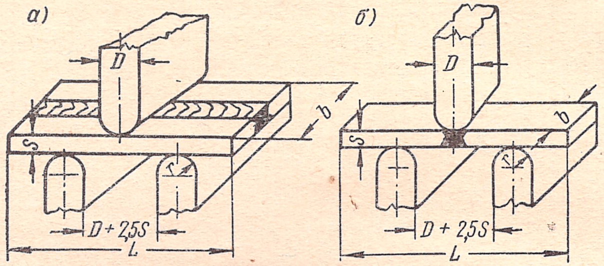
Пластичность металла оценивается по углу загиба, образующемуся при испытании до момента появления первой трещины.

Формы образцов (по ГОСТ 6996—54) приведены на фиг. 31. Утолщение шва снимают до уровня основного маталла. Ширина образцов $b = S + 30$ *мм* при $S \geqslant 5$ *мм*, $b = S + 15$ *мм* при $S \leqslant 5$ *мм* (фиг. 31, *а*); $b = 1,5\,S$ для образца по фиг. 31, *б*. Длина образцов $L = D + 2,5\,S + 80$ *мм*, где D[1] — диаметр оправки

[1] Размер D указывается в технических условиях, а при отсутствии указаний принимается равным двум толщинам основного металла.

(фиг. 32, *а, б*); тогда расчетная длина $l = D + 2{,}5\,S + 2\,r = \frac{L}{3}$ *мм*; $r = S$ (не более 25 *мм*).

Испытания должны проводиться при плавном нарастании силы давления на образец со скоростью движения пуансона не более 15 *мм/мин*.



Фиг. 32. Схема испытания сварных соединений на загиб.

В растянутой зоне образца располагаются поверхностные слои при испытании одностороннего шва и шов или слой, заваренные последними при испытании двустороннего шва.

8. КОРРОЗИОННЫЕ И МЕТАЛЛОГРАФИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Виды коррозии и способы определения коррозионных свойств сварных соединений

Коррозионным испытаниям подвергают металлы, сплавы и сварные соединения, предназначенные работать в условиях жидких или газовых агрессивных сред. Коррозионные исследования необходимы для хромоникелевых аустенитных сталей, из которых изготовляют конструкции и аппараты для химической и нефтеперерабатывающей промышленности, а также жаропрочных и окалиностойких сталей, работающих при высоких температурах в условиях агрессивной газовой среды. Целью испытаний является установление долговечности работы конструкции в условиях данной агрессивной среды.

По своему характеру коррозия подразделяется на межкристаллитную и общую.

М е ж к р и с т а л л и т н а я к о р р о з и я (фиг. 33) может развиваться в зоне термического влияния основного металла на некотором удалении от шва, по линии сплавления основного металла с металлом шва (так называемая ножевая коррозия), в металле шва.

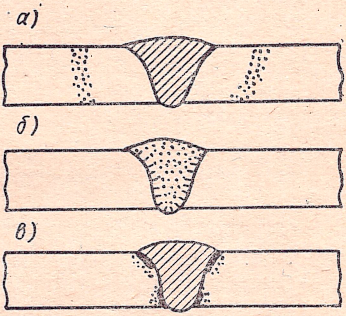
Межкристаллитная коррозия, независимо от того, в какой части сварного соединения она развивается, есть результат проникания агрессивной среды в глубь металла по границам зерен (кристаллов), отсюда и название межкристаллитная коррозия.

Межкристаллитная коррозия в основном металле является результатом действия сварочного нагрева. Под влиянием этого нагрева металл зоны термического воздействия находится более или менее длительное время в нагретом состоянии при критических температурах (450—850°), что приводит к выделению карбидов хрома, понижению концентрации хрома на поверхности зерен металла и растворению обедненного хромом металла агрессивной средой, т. е. к развитию межкристаллитной коррозии.

Межкристаллитная коррозия в наплавленном металле может быть вызвана следующими причинами:

1) склонностью металла к межкристаллитной коррозии (в зависимости от его химического состава);

2) нагревом металла до критических температур в процессе эксплуатации изделия.



Фиг. 33. Схема межкристаллитной коррозии: *а* — основного металла; *б* — металла шва; *в* — металла по линии сплавления.

Межкристаллитная коррозия по линии сплавления (ножевая коррозия) возникает в результате нагрева хромоникелевых аустенитных сталей до температур, превышающих 1200—1250°. Этому виду коррозии подвергаются хромоникелевые аустенитные стали, стабилизированные титаном, ниобием или танталом. При нагреве этих сталей до указанных температур карбиды титана или ниобия растворяются в аустените. При последующем воздействии критических температур в участках основного металла, нагревавшихся до температуры растворения карбидов, титан и ниобий остаются в твердом растворе, по границам зерен выпадают карбиды хрома, и развивается межкристаллитная коррозия.

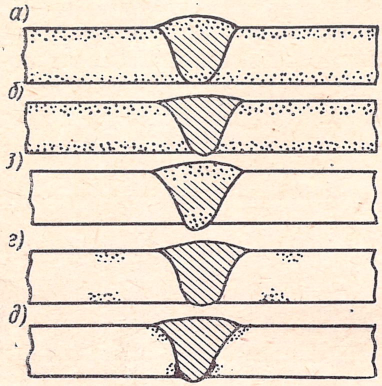
О б щ а я к о р р о з и я является результатом растворения металла в агрессивной среде. По своему характеру общая коррозия может быть р а в н о м е р н о й, при которой с одинаковой скоростью разрушается основной металл и металл шва; с о с р е д о т о ч е н н о й, при которой быстрее разрушается металл шва или же в определенных местах основной металл и металл по линии сплавления. На фиг. 34 приведена схема общей коррозии металлов.

Единой методики для определения коррозийной стойкости сварных соединений хромоникелевых сталей нет.

Наиболее распространенным является метод испытаний в кипящей азотной кислоте различной крепости. Этот метод заключается в определении коррозийной стойкости по потере веса в результате нескольких циклов кипячения. Продолжительность каждого цикла колеблется от 24 до 48 час. В данном случае величина

коррозии определяется удельной потерей веса в единицу времени (*Г/м² час*) и носит название *весового метода*.

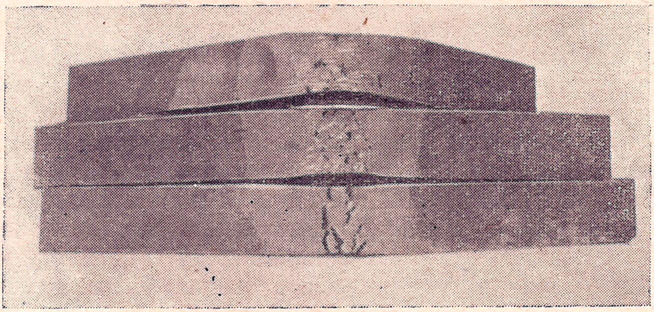
Однако следует отметить, что весовой метод определения коррозионной стойкости не учитывает возможной местной сосредоточенной коррозии на сварном шве или в околошовной зоне. В связи с этим заслуживает внимания так называемый *профилографический метод*, разработанный Институтом электросварки имени Е. О. Патона применительно к углеродистым и низколегированным сталям.



Фиг. 34. Схема общей коррозии: *а* — равномерной; *б* — ускоренной в основном металле; *в* — сосредоточенной на шве; *г* — сосредоточенной в основном металле; *д* — сосредоточенной у линии сплавления.

Сущность этого метода заключается в том, что степень коррозии сварных соединений определяется по профилограммам, которые строятся для каждого образца на основании измерения профиля торцовой поверхности стрелочным индикатором до и после воздействия агрессивной среды с последующим сравнением результатов измерения.

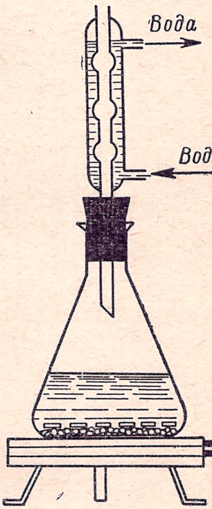
Особенностью испытаний на межкристаллитную коррозию является то, что образцы, подвергнутые воздействию агрессивной среды, испытывают на изгиб. При этом наличие сетки трещин на поверхности растянутых волокон образца (фиг. 35) свидетельствует о склонности металла к межкристаллитной коррозии. Кроме того, образцы, подверженные коррозии, теряют свой металлический звук и при ударах или падении издают глухой звук.



Фиг. 35. Вид образцов из стали 1Х18Н9Т после испытания на межкристаллитную коррозию.

Склонность стали к межкристаллитной коррозии определяют по ГОСТ 6032—58. В зависимости от марки стали применяют один из следующих методов.

Метод А предназначен для сталей марок Х13Н4Г9, Х14Г14Н3Т, 1Х18Н9Т, Х22Н6Т, 2Х18Н9, Х20Н14С2, ЭИ694, ЭИ695 и их сварных соединений. В качестве коррозионной среды используют раствор, содержащий 110 *г* $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ (медный купорос), 55 *мл* серной кислоты удельного веса 1,835 и 1 *л* воды. Испытания проводят по схеме, показанной на фиг. 36. На дно сосуда помещают стеклянные бусы или разрезанные стеклянные палочки и на них укладывают образцы так, чтобы они не касались друг друга. Раствор заливают в сосуд из расчета 100 *мл* на один образец. Образцы из стали марок Х20Н14С2, 2Х18Н9, Х13Н4Г9, Х14Г14Н3Т выдерживают в кипящем растворе в течение 24 час., а из стали марок 1Х18Н9Т, Х22Н6Т, ЭИ694 и ЭИ695 — в течение 72 час. После указанных испытаний образцы подвергают изгибу на 90°, при этом радиус закругления оправки должен быть не менее трехкратной толщины образца, но не более 10 *мм*. Наличие сетки трещин в месте изгиба свидетельствует о склонности сварного соединения к межкристаллитной коррозии.



Фиг. 36. Схема установки для испытания сталей на межкристаллитную коррозию.

Метод АМ предназначен для стали марок 0Х18Н9, 1Х18Н9, Х23Н18, 018Н9Т, 1Х18Н9Т, 1Х18Н12Т, Х18Н11Б, Х18Н12М2Т, Х18Н12М3Т и их сварных соединений. В данном случае коррозионной средой является раствор, содержащий 160 *г* $CuSO_4 \cdot 5H_2O$, 100 *мл* серной кислоты удельного веса 1,835, 1 *л* воды. В этот раствор добавляют медную стружку. Схема испытаний та же, что и в предыдущем случае, с той лишь разницей, что на дно сосуда помещают медную стружку, а сверху образцы одной марки стали. Образцы подвергают непрерывному кипячению в течение 24 час., после чего промывают, сушат и испытывают на загиб под углом 90°. Техническими условиями срок испытания на коррозию по методу АМ может быть увеличен до 48 час.

Метод В предназначен для сталей марок 0Х23Н28М3Д3Т, Х23Н28М3Д3Т, Х23Н27М2Т и их сварных соединений. В качестве коррозионной среды применяют раствор, содержащий 110 *г* $CuSO_4 \cdot 5H_2O$, 55 *мл* серной кислоты удельного веса 1,835, 1 *л* воды, 5 *г* цинковой пыли. Испытание проводится по той же схеме (фиг. 36). Раствор заливается с таким расчетом, чтобы его уровень в сосуде был выше образцов на 20 *мм*. Цинковая пыль, добавляемая в раствор, вызывает реакцию выделения водорода; когда эта реакция закончится, соединяют сосуд с холодильником. Об-

разцы подвергают непрерывному кипячению в течение 144 час. В случае вынужденного перерыва образцы вынимают из сосуда, промывают, просушивают и повторно загружают так же, как и в начале. Продолжительность испытания принимается как суммарное количество часов кипячения до вынужденного перерыва и после перерыва. Испытание завершается загибом образцов на 90°.

Метод Г предназначен для контроля стали марок Х23Н27М2Т, 0Х23Н28М3Д3Т. В качестве агрессивной среды используется 10-процентный раствор (по весу) азотной кислоты плюс 2-процентный раствор фтористого натрия. В качестве реакционного сосуда применяют сварной бачок из аустенитной хромоникелевой стали, на дно которого и укладывают контролируемые образцы. Раствор заливается из расчета 5 *мл* на 1 $см^2$ площади испытываемых образцов в следующей последовательности. Сначала заливают раствор азотной кислоты и нагревают его до 80° С, а затем засыпают фтористый натрий. Образцы выдерживаются в этой среде при температуре $80 \pm 2°$ С в течение одного часа, а затем раствор сливают, образцы промывают и вновь загружают в свежий раствор того же состава, нагретый до 80° С. Длительность испытания указанных марок стали — 3 цикла по 1 часу каждый с заменой раствора свежим после каждого цикла. По окончании испытаний образцы подвергают изгибу на 90°. В случае повышенной общей коррозии стали этот метод неприменим и рекомендуется испытание по методу В.

Метод Д применяется для контроля закаленной на аустенит хромоникелевой стали марок 0Х18Н9Т, 1Х18Н9Т, Х18Н9Б и сварных соединений из них, предназначенных для работы в азотной кислоте концентрацией до 65% при температурах от 60° С до кипения. Коррозионной средой служит 65-процентный раствор (по весу) азотной кислоты, который заливается в сосуд из расчета 50 $см^3$ на один образец. На дно сосуда укладывают стеклянные бусы или стеклянные палочки, а на них образцы испытуемой стали. Предварительно образцы взвешивают на аналитических весах с точностью до 1 *мг*. Раствор доводят до кипения, и в этих условиях образцы выдерживают в течение 48 час., после чего раствор сливают, образцы промывают, просушивают и взвешивают для определения коррозионной стойкости по скорости коррозии, выражаемой в $Г/м^2$ за каждые 48 час. Продолжительность испытания — 3 цикла по 48 час. При скорости коррозии 1,5 $Г/м^2$ *час* в первые два цикла испытания прекращают. Образцы считаются не выдержавшими испытания, если скорость коррозии стали превышает 1,5 $Г/см^2$ *час* или если после металлографических исследований неизогнутых образцов наблюдается разрушение границ зерен металла даже на глубину в один слой кристаллов.

После каждого цикла раствор заменяется свежим.

Установлено [23], что сварные швы в разной степени подвергаются коррозии в одной и той же агрессивной среде при раз-

личных соотношениях поверхностей основного металла и собственно сварного шва. Желательно, чтобы это соотношение в образцах было максимальным.

ГОСТ 6032—58 рекомендует следующие размеры сварных образцов:

а) для образца с одним швом размер должен быть 20×80 *мм*;

б) для образцов с двумя перекрещивающимися швами — 35×80 *мм*.

Допускаются и другие формы и размеры образцов.

Толщина образцов может быть различной в зависимости от толщины испытуемого металла. При толщине материала до 10 *мм* толщина образца должна равняться толщине материала и испытание проводится на двух образцах. При толщине материала от 10 *мм* и выше образцы в количестве 4 шт. должны быть подвергнуты механической обработке по толщине путем строжки поверхностей.

При этом два образца обрабатывают с одной стороны, а два остальных — с другой, доводя образцы до толщины 3—5 *мм*.

Во всех случаях образцы вырезают механическим способом. Контролируемые поверхности обрабатывают до чистоты $\bigtriangledown 7$.

Металлографические исследования сварных швов и соединений

Металлографическое исследование сварных швов и соединений сводится к изучению макро- и микроструктуры и исследованию структуры металла по излому.

М а к р о с к о п и ч е с к и е и с с л е д о в а н и я представляют собой изучение сечений металла сварных соединений невооруженным глазом или при очень малых увеличениях после шлифовки плоскости сечения и соответствующего травления. Макрошлифы изготовляют из специальных контрольных пластин или из материала самого контролируемого изделия, что устанавливается техническими условиями и нормами. Макрошлиф приготовляют с таким расчетом, чтобы поверхность, подлежащая исследованию, включала в себя полное сечение шва, зону термического воздействия и основной металл, не подвергшийся изменению под действием сварочного тепла. В результате травления макрошлифа должны быть четко выявлены границы между основным и наплавленным металлом, между зоной термического воздействия и металлом, оставшимся без изменения, между отдельными слоями (при многослойной сварке).

Исследование макрошлифа позволяет выявить характер первичной кристаллизации металла шва, глубину и форму провара, ширину и очертания зоны термического воздействия, а также возможные пороки сварки в виде непроваров, макротрещин, пор и шлаковых включений, неоднородности структуры шва, зональной ликвидации и размеры зерна в наплавленном и основном металле.

Таким образом, на основании макроисследований можно сделать выводы о строении сварного соединения в целом, его кристаллической, механической и химической неоднородности.

Фотографирование макрошлифов обычно производят сразу же после травления.

Приведем реактивы, рекомендуемые для травления макрошлифов.

1. Раствор 25 *см*³ HNO_3 в 75 *см*³ воды. Применяется для выявления характера кристаллизации наплавленного металла и зоны термического воздействия при сварке углеродистых, средне- и низколегированных сталей. Длительность травления 0,5—1мин. при нормальной температуре.

2. Раствор 10—15 *г* надсерноаммониевой соли $(NH_4)_2\ S_2O_8$ в 100 *см*³ воды. Применяется для выявления кристаллической структуры, дендритов и сегрегации в сталях и чугуне. Длительность травления 1—2 мин. при нормальной температуре.

3. Для травления аустенитных сталей, латуней и бронз рекомендуется следующий состав реактива: раствор 30 *см*³ соляной кислоты HCl и 10 *г* хлорного железа $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ в 120 *см*³ воды. Длительность травления 1—2 мин.

Изучение строения металла сварного соединения по излому является одним из способов макроскопического исследования. По внешнему виду излома можно установить волокнистое строение металла, отвечающее вязкому — пластическому виду разрушения, или кристаллическое строение, характеризующее хрупкий вид разрушения.

Крупнозернистое строение металла в изломе характеризует низкие механические свойства его по сравнению с мелкозернистым.

В изломах различных сталей и сварных соединений можно обнаружить так называемые флокены, представляющие собой волосные трещины длиной от долей миллиметра до 5—7 *мм*, причиной возникновения которых является водород, выделяющийся из стали при ее охлаждении.

В изломах сварных соединений могут быть обнаружены внутренние пороки сварных швов в виде пор, раковин, неметаллических включений, непроваров и горячих трещин.

Макроструктура сварных соединений по излому исследуется после технологических и механических испытаний. Иногда изломы металла изучаются при большом увеличении.

Микроскопическое исследование заключается в изучении строения отдельных участков сварного соединения при большом увеличении. Для микроскопических исследований изготовляются такие же образцы, как и для макроисследований, но с более тщательной подготовкой поверхности шлифа путем шлифовки, полировки и травления.

После полировки поверхность шлифа протирается ватой, смоченной в спирте, а затем просматривается под микроскопом при

увеличении в 100—150 раз для выявления загрязненности наплавленного металла неметаллическими включениями, наличия прослоек, микротрещин и газовых пор, а также для установления тщательности подготовки шлифа.

После травления микрошлиф исследуют под микроскопом при увеличении в 150—300 раз. Микроисследованиями устанавливают: микроструктуру наплавленного металла, зоны термического воздействия и основного металла, наличие закаленных структур в виде мартенсита, бейнита, троостита, наличие структуры перегрева, размеры зерна, микроскопические пороки в виде микропор, микротрещин и др.

Таким образом, микроисследование дает возможность изучить структуру характерных участков металла сварного соединения, приблизительно оценить его механические свойства.

Рекомендуются следующие реактивы для травления микрошлифов.

1. Раствор 4 *см*³ азотной кислоты HNO_3 в 96 *см*³ этилового спирта. Применяется для выявления микроструктуры малоуглеродистых и низколегированных сталей. Длительность травления 0,5—1 мин. при нормальной температуре.

2. Раствор 25 *г* едкого натра $NaOH$ и 2 *г* пикриновой кислоты $C_6H_6(NO_2)_3OH$ в 100 *см*³ воды. Применяется для травления аустенитной стали. Длительность травления 1—2 мин.

3. Реактив, состоящий из 1 объема 25-процентного раствора аммиака NH_4OH и 1 объема 3-процентного раствора перекиси водорода H_2O_2. Применяется для травления меди. Длительность травления 5—15 сек. Пользуются свежеприготовленным раствором.

ГЛАВА IV

МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ БЕЗ РАЗРУШЕНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ

9. ЛЮМИНЕСЦЕНТНЫЙ И ЦВЕТНОЙ МЕТОДЫ КОНТРОЛЯ

Люминесцентный метод и область его применения

Люминесцентный метод основан на свойстве некоторых веществ, поглощающих лучистую энергию, издавать собственное свечение. Это явление носит название люминесценции. Свойством люминесценции (под действием ультрафиолетовых лучей) обладают многие минеральные масла — трансформаторное, автол, авиационное и др. Люминесцентные жидкости (часто называемые люминофорами), используемые для контроля сварных соединений должны легко проникать в различные мелкие пороки — трещины, надрывы, поры. Поэтому применяют жидкости — смеси с меньшим коэффициентом вязкости, чем одно масло, и лучшей проникаемой способностью. Такими веществами, понижающими вязкость масел, являются бензин, керосин, лигроин и т. п.

Контролируемое изделие, предварительно очищенное от загрязнений, погружают на несколько минут в люминофор или последний наносят на поверхность сварных соединений при помощи кисти.

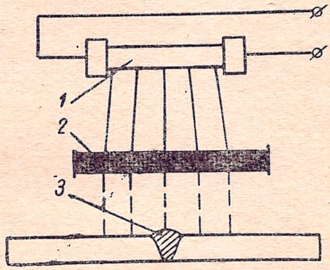
После того как изделие вынуто из люминофора, остатки последнего смывают с поверхности струей холодной воды, затем поверхность просушивают теплым воздухом. Просушенное изделие посыпают тонко размолотым сухим порошком окиси магния, углекислого магния, талька или силикогеля, который пропитывается оставшимся в трещинах и порах люминофором. Порошок извлекает люминофор на поверхность и частично проникает внутрь порока. Избыточный порошок удаляют струей воздуха или легкими ударами по изделию.

Затем контролируемое изделие подвергают облучению ультрафиолетовыми лучами в специальном затемненном помещении. Под действием ультрафиолетовых лучей порошок, пропитанный люминофором, светится (флуоресцирует). Трещины выявляются в виде ярко светящихся зигзагообразных линий.

Люминесцентный метод применяют для выявления поверхностных пороков, главным образом трещин и надрывов в сварных соединениях из аустенитных сталей, цветных и легких металлов, их сплавов и других немагнитных материалов, а также для контроля сварных швов на герметичность (непроницаемость для жидкостей и газов).

При контроле сварных швов на герметичность люминофор наносят на поверхность сварного соединения, противоположную той, которая подлежит контролю. Неплотность шва обнаруживается по свечению, которое показывает, что люминофор проник на другую сторону шва.

Возбуждение люминесценции чаще всего производится невидимыми ультрафиолетовыми лучами.



Фиг. 37. Схема контроля люминесцентным методом:

1 — ртутно-кварцевая лампа; *2* — светофильтр; *3* — сварной шов.

В качестве источника ультрафиолетовых лучей применяют ртутно-кварцевые лампы высокого давления со светофильтрами, изолирующими видимый свет (фиг. 37). Например, лампы типа СВДШ-250 и СВД-120, а также менее удовлетворительные лампы низкого давления типа ПРК.

Для контроля крупных изделий применяют переносные установки, а для контроля мелких деталей — стационарные и передвижные.

В качестве люминесцентных жидкостей рекомендуются такие, которые, обладая хорошей проникающей способностью в трещины и поры, не вступают в химические реакции с материалом контролируемого изделия и дают флуоресценцию, легко (без утомления) воспринимаемую человеческим глазом. Так как минеральные масла и керосин флуоресцируют синевато-белым свечением, утомляющим глаза, то для изменения цвета флуоресценции в люминесцентную жидкость-смесь вводятся добавки других, сильно флуоресцирующих веществ с желто-зеленым свечением.

Такими веществами являются:

1) дефектоль зелено-золотистый — жидкость, дающая яркое желто-зеленое свечение, легко воспринимаемое глазом;

2) нориоль — жидкость, приготовленная из некоторых сортов нефти, очищенной от примесей, гасящих свечение люминесценции, также имеющая яркое желто-зеленое свечение.

Лучшими люминофорами являются смеси жидкости следующего состава:

1) керосин 50%, трансформаторное масло 25%, бензин 25% и 0,25 *г* зелено-золотистого дефектоля на 1 *л.* смеси;

2) нориоль 30—40%, керосин (или лигроин) 60—70%.

Состав с нориолем дает более четкое выявление даже мелких поверхностных пороков по сравнению с составом жидкости, со-

держащей дефектоль [1]. Однако состав с нориолем плохо смывается с поверхности изделия — для этого необходима струя воды под давлением 3—4 *ат*. Жидкость, содержащая дефектоль, смывается гораздо легче.

Цветной метод и области его применения

Сущность цветного метода контроля заключается в том, что на предварительно очищенную от загрязнений, ржавчины, окалины и масла поверхность контролируемого изделия наносится жидкость с растворенным в ней ярким красителем. Жидкости с красителем должны обладать хорошей проникающей способностью. Такими жидкостями являются смеси керосина с минеральным маслом. В качестве красителя используется ярко-красная краска судан III в количестве 8—10 *г* на 1 *л* жидкости (для получения насыщенного раствора красителя).

Изделия небольших размеров помещают в сосуд с окрашенной жидкостью. После выдержки в жидкости в течение 10—15 мин. изделие промывают 5-процентным водным раствором кальцинированной соды, а затем протирают насухо ветошью.

Изделия больших размеров в области сварных соединений несколько раз покрывают красящей жидкостью с таким расчетом, чтобы она проникла в полости пороков.

Для выявления пороков на поверхность контролируемого изделия при помощи пульверизатора наносят раствор каолина в воде из расчета 600—700 *г* каолина на 1 *л* воды, после чего поверхности с нанесенным слоем каолина просушивают теплым воздухом. При наличии в изделии поверхностных пороков (в виде трещин и мелких пор) оставшаяся в них жидкость с красителем будет выступать на белом фоне в виде ярко-красных контуров пороков.

Для цветного метода контроля можно рекомендовать следующие составы подкрашенных жидкостей:

1) керосин 70%, трансформаторное масло 30%;
2) керосин 65%, трансформаторное масло 30% и скипидар 5%;
3) керосин 80%, трансформаторное масло 15% и скипидар 5%.

Цветной метод контроля применяется для выявления малозаметных поверхностей пороков в любых металлах, а также для контроля герметичности сварных швов.

Наиболее рационально применение цветного метода для контроля обработанных после сварки поверхностей с целью выявления мелких трещин и надрывов, возникающих в металле шва при сварке аустенитных, хромоникелевых сталей, а также алюминиевых и медных сплавов.

[1] М. В. Брук, Люминесцентный и цветной способы контроля, Сб. «Методы контроля качества сварных швов и конструкций», кн. № 50, НТО Машпром, 1958.

При контроле сварных швов на герметичность наносят раствор каолина со сторны, удобной для наблюдения, а с противоположной стороны — состав жидкости с красителем. При наличии неплотностей на поверхности, покрытой раствором каолина, будут обнаружены ярко-красные контуры пороков.

Цветной состав жидкости для контроля сварных швов на герметичность состоит из керосина, окрашенного суданом II, III, IV.

Чувствительность люминесцентного и цветного методов контроля, их достоинства и недостатки

Чувствительность люминесцентного метода зависит от рода применяемого люминесцирующего вещества, его способности проникать в мельчайшие полости пороков, а также от вида и мощности источника возбуждения люминесценции.

При помощи люминесцентного метода можно выявить поверхностные трещины шириной не менее 0,01 *мм* и глубиной не менее 0,02—0,03 *мм.* Цветным методом выявляют поверхностные трещины с раскрытием не менее 0,01 *мм* при глубине их не менее 0,03—0,04 *мм.*

Достоинствами люминесцентного метода являются:

1) высокая чувствительность;

2) возможность контроля сложных по конфигурации изделий из любых металлов и сплавов;

3) простота аппаратуры, малая ее стоимость при малых эксплуатационных расходах;

4) простота, доступность и надежность выявления поверхностных пороков, а также контроля плотности сварных соединений.

К числу недостатков можно отнести:

1) необходимость затемненного помещения для контроля;

2) применение воды для тушения флуоресценции, что препятствует использованию способа при низких температурах.

Достоинствами цветного метода являются:

1) отсутствие специального оборудования;

2) простота, доступность и надежность выявления поверхностных пороков и контроля непроницаемости сварных соединений;

3) возможность контролировать изделия из любых металлов и сплавов.

Не рекомендуется контролировать цветным методом изделия сложной конфигурации.

Сопоставление обоих методов контроля позволяет сделать следующие выводы:

1) оба метода дают возможность надежно выявлять наружные пороки, не обнаруживаемые внешним осмотром;

2) чувствительность цветного метода несколько ниже люминесцентного;

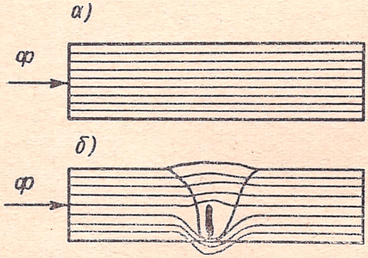
3) цветной метод проще и доступнее.

10. МАГНИТНАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ СВАРНЫХ ШВОВ И СОЕДИНЕНИЙ

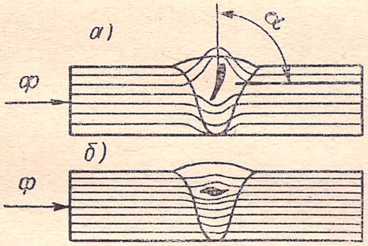
Сущность магнитной дефектоскопии

Магнитной дефектоскопией можно обнаруживать пороки только в ферромагнитных материалах, таких, как железо, никель, кобальт, углеродистые, низколегированные и некоторые легированные стали.

При магнитных методах контроля контролируемое изделие (а при больших габаритах часть его) предварительно намагничи-



Фиг. 38. Схема распределения магнитного потока: *а* — в материале, не имеющем несплошностей; *б* — в материале с нарушенной сплошностью.



Фиг. 39. Схема полей магнитного рассеяния в зависимости от угла (α) расположения в сварном шве порока удлиненной формы: *а* — $\alpha = 90°$; *б* — $\alpha = 0$.

вают одним из указанных ниже способов для того, чтобы создать в изделии магнитный поток.

Магнитный поток Φ при однородности и сплошности металла сварного соединения распределится в нем равномерно, без искажений (фиг. 38, *а*).

Если же в металле имеются неоднородные включения с другой магнитной проницаемостью или сплошность сварного соединения нарушена различными пороками в виде непроваров, трещин, надрывов, крупных газовых и шлаковых включений, образовавшихся в процессе сварки, магнитный поток исказится. Это искажение вызывает появление местных магнитных потоков рассеяния (фиг. 38, *б*), которые располагаются над дефектами, и, выйдя на поверхность металла, образуют подобие магнита, что может быть обнаружено. Таким образом, выявление пороков в сварных соединениях магнитными способами основано на возникновении над дефектными местами местных магнитных потоков рассеяния и обнаружении (или улавливании) этих потоков.

Появление магнитных потоков рассеяния и их величина зависят от ряда факторов и прежде всего от размеров и формы порока, его расположения относительно направления магнитного потока, глубины залегания и др.

Чем больше размеры порока, тем сильнее местные магнитные потоки рассеяния, тем легче они обнаруживаются. С увеличением глубины залегания пороков магнитные поля рассеяния становятся слабее и могут совсем не выходить на поверхность контролируемого изделия, тогда обнаружение их становится невозможным. Если порок имеет удлиненную форму, то его выявление будет зависеть от того, под каким углом находится этот порок по отношению к магнитному потоку. Чем больше угол α (фиг. 39, *а*), тем сильнее магнитное поле рассеяния.

Совпадение направления порока вытянутой формы с направлением магнитного потока может не вызвать местных потоков рассеяния, и тогда порок не обнаруживается. Плохо или совершенно не обнаруживаются мелкие поры сферической формы, если они залегают на некоторой глубине (чем глубже, тем труднее выявить).

Способы намагничивания изделия

Для намагничивания контролируемых изделий может быть использован как постоянный, так и переменный ток, каждый из которых имеет свои положительные и отрицательные стороны.

Применение постоянного тока предпочтительнее в тех случаях, когда необходимо обеспечить (в пределах чувствительности метода) выявление внутренних пороков, чему способствует равномерное распределение магнитного потока по всему сечению изделия. В качестве источников постоянного тока для намагничивания могут быть использованы мотор-генераторы напряжением 6—12 *в* и мощностью 8—10 *ква*, аккумуляторные батареи напряжением 6 *в* (по 6—8 батарей, включенных параллельно), сварочные генераторы мощностью 18—20 *ква*.

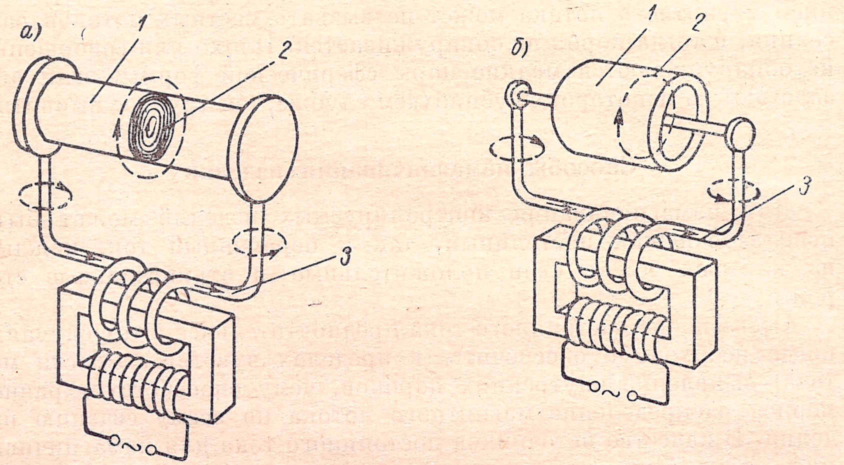
В последнее время для намагничивания стали применять постоянный пульсирующий ток, получаемый выпрямлением переменного тока мощными селеновыми или германиевыми выпрямителями напряжением 6—8 *в*, дающими пульсирующий ток силой 1000—2000 *а* и больше.

При намагничивании переменным током вследствие так называемого скин-эффекта плотность тока, а следовательно, и магнитного потока будет больше у поверхности намагниченного изделия, а поэтому чувствительность при выявлении глубинных пороков получается очень низкая, в силу чего переменный ток следует применять для выявления поверхностных пороков. В качестве источников намагничивания переменным током могут служить сварочные трансформаторы для дуговой электрической сварки типа СТЭ-34, СТН-500, СТН-700 и др., а также трансформаторы контактных сварочных аппаратов для точечной и стыковой сварки различной мощности.

Способ намагничивания контролируемого изделия является одним из важнейших факторов, сильно влияющих на эффективность

метода магнитного контроля. Существуют несколько способов намагничивания.

Продольное и поперечное намагничивание осуществляют электромагнитами или соленоидами. При продольном намагничивании магнитный поток имеет направление вдоль оси сварного шва контролируемого изделия, а при поперечном — поперек оси. Таким образом, продольным намагничиванием выявляют пороки, расположенные поперек оси сварного шва, а поперечным — пороки, расположенные вдоль оси шва.



Фиг. 40. Схема циркулярного намагничивания: *а* — через деталь; *б* — через проводник, проходящий в полой детали;

1 — контролируемое изделие; *2* — магнитные линии; *3* — проводник намагничивающего тока.

Продольное намагничивание соленоидом рекомендуется для контроля сварных изделий или конструкций из трубчатых элементов (трубопроводов, газопроводов и сложных трубчатых сварных узлов).

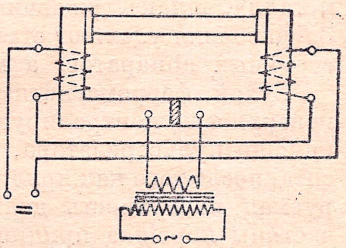
Циркулярное намагничивание осуществляется пропусканием тока непосредственно через контролируемое изделие или же через проводники, проходящие внутри полого изделия (фиг. 40). Циркулярное намагничивание рекомендуется для выявления продольных пороков (сварных швов труб, тавровых соединений и т. п.).

Комбинированное намагничивание применяется в тех случаях, когда необходимо выявить пороки, расположенные в сварном соединении в разных направлениях по отношению к магнитному потоку. В этом случае изделие намагничивается в двух взаимно перпендикулярных направлениях с использованием для этого постоянного магнитного потока, создаваемого

электромагнитом, и магнитного потока, создаваемого циркулярным магнитным полем переменного тока (фиг. 41).

Комбинированный способ намагничивания является наиболее эффективным, так как позволяет за один прием выявить в сварных соединениях различно ориентированные пороки.

Импульсное намагничивание осуществляется мгновенным пропусканием через изделие электрического тока большой силы. Длительность импульсов может составлять тысячные или миллионные доли секунды, что позволяет получить большие силы тока при малых габаритах аппаратуры и малых сечениях проводов. Импульсы тока могут быть вызваны разрядом батареи конденсаторов (что позволяет иметь импульсы тока с длительностью менее 10^{-6} сек.), специальным трансформатором постоянного тока с быстродействующим прерывателем и различными механическими прерывателями тока. Несмотря на кратковременность импульса, ток большой силы способен осуществить намагничивание изделия для выявления пороков в сварных соединениях. Однако следует заметить, что кратковременность импульса способствует поверхностному намагничиванию, что исключает возможность выявления пороков, залегающих в глубине сварного соединения.



Фиг. 41. Схема комбинированного намагничивания.

Следовательно, этот способ намагничивания применим лишь для выявления поверхностных пороков.

В настоящее время применяются следующие методы магнитного контроля качества сварных соединений: порошковый, индукционный, электромагнитный и магнитографический.

Порошковый метод

Этот метод основан на выявлении местных магнитных полей рассеяния, образующихся в местах расположения пороков, при помощи ферромагнитного порошка.

Существует два способа контроля с использованием ферромагнитного порошка — способ сухого порошка и способ магнитной суспензии.

Способ сухого магнитного порошка заключается в том, что частицы ферромагнитного порошка, попав в магнитный поток рассеяния, будут там скапливаться, что и дает возможность судить о наличии в этом месте порока. При этом в случае трещины или непровара ферромагнитный порошок располагается по длине такого порока, указывая его протяженность.

В качестве ферромагнитного порошка применяются: железная окалина Fe_3O_4 (отходы кузнечных и прокатных цехов), измельченная до состояния пудры (просев через сито, имеющее 3600 отверстий на *см*²); магнетит; молотая или толченая стружка серого чугуна и др.

Размеры частиц порошка должны быть в пределах 10 *мк*, так как увеличение их снижает чувствительность метода вследствие меньшей подвижности частиц с большей массой. Более крупный порошок (до 100 *мк*) рекомендуется применять при выявлении крупных и глубоко залегающих пороков.

Для того чтобы облегчить выявление пороков в сварных швах и соединениях, рекомендуется очищать поверхность контролируемых швов и участков, прилегающих к ним, от загрязнений (брызг металла, шлака, ржавчины, окалины, масляных пятен и т. п.). Загрязнения удаляют стальными щетками или при помощи пескоструйных аппаратов, а масляные пятна — растворителями.

Сухой ферромагнитный порошок наносится на очищенную поверхность контролируемого изделия равномерным слоем при помощи пульверизатора, специального распылителя или ручного сита, после того как приложено намагничивающее поле. Контролируемая поверхность должна быть сухой, в противном случае частицы порошка прилипнут к поверхности и не будут перемещаться под действием магнитных сил.

В случае контроля темных поверхностей следует применять светлые или специально окрашенные порошки, а при контроле светлых поверхностей — порошки с темной окраской.

Рекомендуется до выключения тока постучать по контролируемому изделию, что облегчает перемещение ферромагнитных частиц и их ориентацию в направлении магнитных потоков рассеяния. Излишний магнитный порошок сдувают струей воздуха.

Контроль магнитным порошком может осуществляться как при намагничивающем поле, так и при остаточной намагниченности. Опыт[1] показывает, что контролю при остаточной намагниченности могут подвергаться изделия из материала, обладающего коэрцитивной силой не менее $H_c = 10—15$ *э* и остаточной индукцией $B = 100\,000$ *гс*. Такими свойствами обладает большинство конструкционных сталей, а также высокоуглеродистые и легированные стали — после термической обработки.

Чувствительность контроля магнитным порошком в очень сильной степени зависит от величины напряженности намагничивающего поля. Эта чувствительность возрастает с увеличением напряженности поля. Однако при очень сильной напряженности намагничивающего поля будут появляться магнитные поля рассеяния на границах разнородных структур (наплавленный металл и основной), в местах царапин и других местах кажущихся поро-

[1] Е. С. Лев, Магнитный порошковый способ дефектоскопии и его применение для контроля сварных швов, кн. № 50, НТО Машпром, 1958.

ков, затрудняя выявление истинных пороков. С уменьшением напряженности намагничивающего поля обнаружение пороков становится затруднительным и при очень малой напряженности они могут остаться совершенно невыявленными.

Практически установлено, что для выявления большинства наружных пороков при контроле в приложенном поле достаточна напряженность 30—60 *э*, а при остаточной намагниченности — 100—180 *э*.

Сила намагничивающего переменного тока при циркулярном намагничивании для получения необходимой напряженности поля приближенно может быть рассчитана по следующим формулам:

$I = 25D$ — для случая контроля способом остаточной намагниченности;

$I = 6D$ — для случая контроля в приложенном поле.

Здесь I — сила тока, а D — диаметр контролируемого изделия в *мм*.

В случае циркулярного намагничивания постоянным током сила тока по сравнению с переменным может быть уменьшена на 30—35%[1].

При намагничивании постоянным током одиночной токопроводящей шиной, располагаемой вдоль сварного шва изделия,

$$I = 5Hr,$$

где H — заданная напряженность поля в эрстедах;

r — расстояние от оси проводника до точки контролируемой поверхности в *см*.

Способ магнитной суспензии заключается в том, что ферромагнитный порошок наносится на контролируемое изделие в мокром состоянии, в виде суспензии. Суспензией называется грубая дисперсная система, в которой твердые частицы находятся во взвешенном состоянии. В качестве жидкостей для приготовления суспензии используются масляно-керосиновая смесь (60% трансформаторного или веретенного масла и 40% керосина), вода.

Чаще всего применяется водная суспензия, которая приготовляется следующим образом:[2] на 1 *л* суспензии разводят в небольшом количестве теплой воды 15—20 *г* олеинового мыла (может быть использовано мыло ядровое или хозяйственное), после чего в мыльный раствор засыпается 50—60 *г* магнетита, и смесь тщательно растирается в ступке, а затем доливается горячая вода до объема 1 *л*. Мыло способствует получению суспензии более стабильного состава и лучшему прилипанию частиц порошка к поверхности контролируемого изделия.

[1] По данным книги В. С. Соколова «Дефектоскопия материалов», Госэнергоиздат, 1957.

[2] М. И. Еремин, Магнитная порошковая дефектоскопия, Машгиз, 1947.

При использовании водной суспензии необходимо предварительное удаление с поверхности контролируемого изделия масляных загрязнений.

На 1 *л* масляно-керосиновой суспензии вводится 100 *г* магнетита.

Применяются следующие три способа контроля с использованием магнитной суспензии.

1. Контролируемое изделие погружается в суспензию на 1—2 мин., а затем извлекается и осматривается с целью выявления пороков по скоплению порошка. Более длительная выдержка изделия в суспензии не рекомендуется вследствие снижения четкости выявления пороков. Этот способ применим для небольших по габаритам изделий.

2. Сварные соединения контролируемого изделия опрыскиваются суспензией при помощи пульверизаторов или краскопультов.

3. На сварные соединения контролируемого изделия наносится суспензия при помощи кисти или поливкой.

Погружение изделия в магнитную суспензию рекомендуется при контроле на остаточном намагничивании, а при контроле в приложенном магнитном поле лучше применять поливку или опрыскивание сварных соединений магнитной суспензией.

Во всех случаях контроля магнитной суспензией необходимо следить за тем, чтобы магнитный порошок находился во взвешенном состоянии, для чего следует время от времени взбалтывать суспензию.

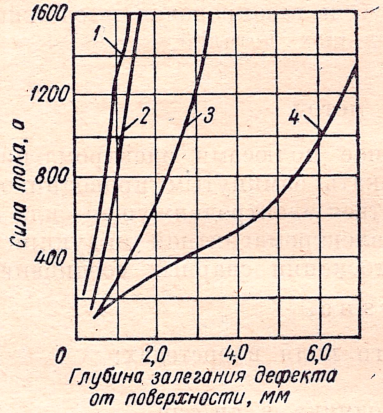
Для контроля методом магнитного порошка созданы и применяются на практике магнитные дефектоскопы, при помощи которых осуществляется намагничивание контролируемых изделий. В промышленности наибольшее распространение получили магнитные дефектоскопы, работающие на переменном токе и обеспечивающие циркулярное намагничивание. Дефектоскопы подразделяются на стационарные, применяемые для контроля малогабаритных изделий, и переносные, предназначенные для контроля крупных изделий по частям.

В Советском Союзе применяются различные типы магнитных дефектоскопов, созданные научно-техническими организациями с учетом особенностей отдельных отраслей промышленности. К числу таких дефектоскопов относятся: ДМ-1500-НИАТ, УМД-9000-ВИАМ, МСА-9000-ВИАМ; МД-4; ПМД-1, УМД-1, ПМШД-1 конструкции ЛИИВТ; МДВ, ЦНВ-2 конструкции ЦНИИТмаш и ряд других.

Чувствительность метода порошковой дефектоскопии зависит от многих факторов: глубины залегания пороков, их размеров и ориентации относительно направления магнитного потока; силы намагничивающего тока; рода тока; способа намагничивания; размера частиц, ферромагнитного порошка и его магнитных свойств; способа нанесения магнитного порошка (сухой или

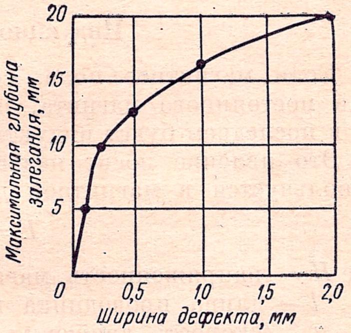
мокрый); пространственного расположения контролируемых швов, их чешуйчатости и др.

Чувствительность порошкового метода при постоянном и переменном токе с использованием сухого порошка и суспензии видна из графика (фиг. 42). Порошковый метод обладает очень высокой чувствительностью при выявлении поверхностных пороков независимо от рода намагничивающего тока и способа нанесения порошка. Этим методом могут быть выявлены выходящие на поверхность закрытые трещины шириной от 0,001 *мм*.



Фиг. 42. График чувствительности магнитной порошковой дефектоскопии:

1 — мокрый метод при переменном токе;
2 — сухой метод при переменном токе;
3 — мокрый метод при постоянном токе;
4 — сухой метод при постоянном токе.



Фиг. 43. График выявляемости дефектов в зависимости от их ширины и глубины залегания.

Что касается выявления подповерхностных пороков, залегающих на глубине от 1 до 4 *мм*, то следует отметить, что лучшие результаты получаются при намагничивании постоянным током и использовании сухого магнитного порошка. Однако необходимо отметить, что способ сухого магнитного порошка применим для контроля сварных швов, расположенных на горизонтальной или наклонной плоскости, так как при иных пространственных положениях чувствительность резко падает, и способ суспензии в таком случае оказывается более пригодным.

На фиг. 43 представлен график выявляемости пороков в зависимости от их ширины и глубины залегания. Из графика следует, что с увеличением глубины залегания порока чувствительность метода резко падает и чем больше глубина, тем большие по размерам пороки могут быть выявлены.

Состояние и внешний вид поверхности сварного шва оказывает большое влияние на чувствительность, а именно: чем крупнее чешуйчатость шва, тем неравномернее чувствительность и тем

труднее становится выявление пороков. В данном случае неровности и шероховатости поверхности вносят искажения в картину полей рассеяния и приводят к ложным сигналам о наличии в шве пороков при их отсутствии в действительности.

Контроль методом магнитного порошка рекомендуется для выявления внутренних пороков, залегающих на глубине 6—7 *мм*, и для выявления поверхностных пороков типа трещин, не обнаруживаемых внешним осмотром. Практически метод применим при контроле сварных тонколистовых конструкций — резервуаров, цистерн, речных судов и других сосудов с толщиной стенки до 10 *мм*, а также тонкостенных труб и газопроводов и сложных по конфигурации машиностроительных деталей.

Индукционный метод

Если магнитное поле, созданное полюсами электромагнита или постоянного магнита, пересекать замкнутым проводником, то в последнем будет индуктироваться электродвижущая сила E.

Это явление носит название электромагнитной индукции и используется в магнитной дефектоскопии сварных соединений.

$$E = Hlv \sin \alpha,$$

где H — напряженность магнитного поля в эрстедах;

l — длина проводника в *см*;

v — скорость движения проводника в *см/сек*;

α — угол между направлением движения проводника и направлением магнитных силовых линий в град.

При $\alpha = 90°$ $\sin \alpha = 1$ и тогда

$$E = Hlv.$$

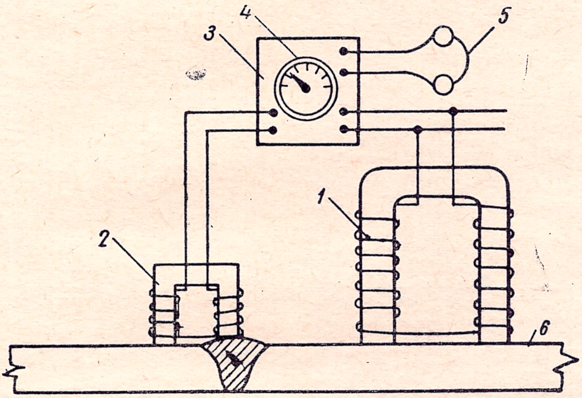
Катушка (искатель) с обмоткой из провода, перемещаемая по поверхности намагниченного контролируемого изделия, пересекает витками магнитные поля рассеяния, вследствие чего в обмотке катушки возникает индукционный ток, который, будучи усилен, регистрируется тем или иным способом. Наличие индукционного тока в обмотке искателя и является показателем недоброкачественности сварного соединения.

Принцип электромагнитной индукции использован в индукционных дефектоскопах различных систем, и в частности в дефектоскопе К. К. Хренова и С. Т. Назарова, схема которого представлена на фиг. 44.

Дефектоскоп состоит из электромагнита *1*, питаемого переменным током, лампового усилителя *3* и искателя *2*. Принцип его действия заключается в следующем.

Электромагнит, включенный в сеть, устанавливается на контролируемое изделие *6* на расстоянии 100—150 *мм* от шва, подлежащего контролю. Электрический ток, проходя по обмотке электромагнита, создает первичную магнитодвижущую силу и

магнитный поток, проходящий по сердечнику электромагнита и по металлу изделия, в результате чего в металле создаются вихревые токи. Эти токи образуют магнитодвижущую силу, противоположную первичной, а также потоки рассеяния, выходящие на поверхность изделия. При отсутствии в сварном соединении пороков потоки рассеяния будут одинаковы по всей длине соединения. В том случае, когда сварное соединение имеет пороки, на поверхности изделия в местах залегания пороков возникнут резко неравномерные местные потоки рассеяния, которые и обнаруживаются искателем.



Фиг. 44. Принципиальная схема дефектоскопа К. К. Хренова и С. Т. Назарова:

1 — электромагнит; *2* — искатель; *3* — усилитель; *4* — стрелочный индикатор; *5* — телефон; *6* — контролируемое изделие.

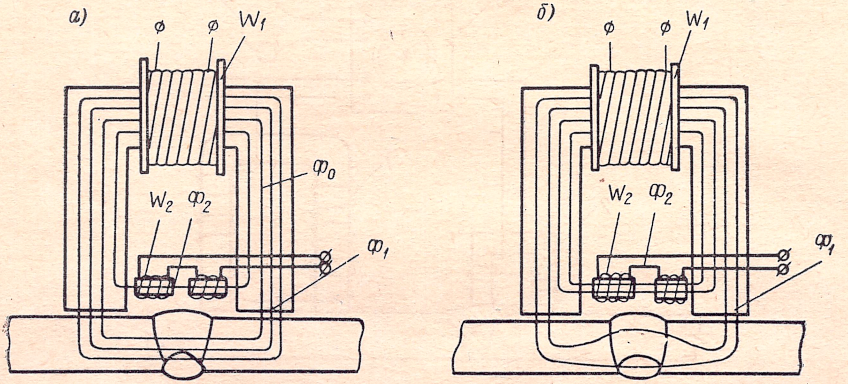
Искатель, представляющий собой П-образный сердечник с двумя дифференциально включенными катушками, расположенными на стержнях сердечника, помещают в латунную или алюминиевую чашечку и заливают парафином. В случае отсутствия в сварном соединении пороков электродвижущая сила в катушках уравновешена. При наличии порока равновесие электродвижущей силы нарушается, а так как искатель соединен проводом с усилителем, то разница в э. д. с. передается на усилитель и обнаруживается стрелочным индикатором *4*, телефоном *5* и лампой «магический глаз» для визуального наблюдения. В телефоне появляется характерный звук, резко отличающийся от того звука, который слышится при отсутствии порока, стрелка индикатора отклоняется вправо, а лампа «магический глаз» (имеющая при отсутствии пороков угол темного сектора, равный 90°) начинает мигать чаще (при сильном сигнале виден сомкнутый темный сектор).

Преимуществом индукционного метода является возможность выявления пороков, залегающих на глубине до 20 *мм*, и бо́льшая

портативность по сравнению с порошковым. Однако по чувствительности индукционный метод уступает порошковому; нередко этот метод применяют для предварительного контроля стыковых швов.

Электромагнитный метод

Электромагнитный метод основан на том, что магнитный поток, создаваемый электромагнитом, будучи введен в металл изделия, распределяется в нем различно в зависимости от магнитного сопротивления контролируемого участка сварного соединения, что может быть обнаружено и зафиксировано.



Фиг. 45. Схема распределения магнитных потоков: *а* — при отсутствии в сварном шве дефекта; *б* — при наличии дефекта.

Для пояснения сказанного рассмотрим следующую схему. Пусть П-образный электромагнит переменного тока (фиг. 45, *а*) при помощи катушки W_1 создает магнитный поток Φ_0, который разветвляется на поток Φ_1, проходящий в основном через металл сварного соединения, и Φ_2, составляющий незначительную часть Φ_0, если сварное соединение не имеет пороков. При наличии в сварном соединении порока составляющая магнитного потока Φ_1 будет изменяться в зависимости от размеров порока, в связи с чем при неизмененной величине магнитного потока Φ_0 будет изменяться и поток Φ_2, протекающий в междуполюсном пространстве (фиг. 45, *б*).

Если между полюсами электромагнита расположить индукционные катушки W_2, то изменение величины магнитного потока Φ_2 вызовет в катушках электродвижущую силу

$$E_2 = 4Kf\Phi_2\omega_2,$$

где K — коэффициент формы магнитного поля;
f — частота переменного тока в *гц*;

Φ_2 — составляющая магнитного потока, проходящего через катушки W_2;

ω_2 — число витков в индукционных катушках.

В электромагнитном дефектоскопе МД-138, предназначенном для использования в судостроительной промышленности, э. д. с., возникшая в индукционных катушках, усиливается посредством специального усилителя напряжения и передается на сигнальную лампочку, находящуюся на магнитной головке, и на микроамперметр, вмонтированный в корпус усилителя.

Магнитная головка состоит из электромагнита и индукционных катушек, смонтированных в одном корпусе из легкого сплава. Положение индукционных катушек относительно контролируемого сварного соединения и полюсов электромагнита может изменяться. Головка установлена на колесиках, при помощи которых она и перемещается над сварным соединением. Сигнальная лампочка в корпусе головки загорается тогда, когда головка находится над участком сварного соединения с недопустимыми пороками. Угол отклонения стрелки микроамперметра характеризует величину порока: чем больше порок, тем больше угол отклонения стрелки.

Данный дефектоскоп применим для контроля стыковых швов при любом пространственном положении их.

Магнитографический метод

Метод разработан ВНИИстройнефть и заключается в следующем:

1) на поверхность контролируемого шва укладывается ферромагнитная лента шириной 35 *мм*, представляющая собой нитроцеллюлозную пленку с нанесенным на нее тонким слоем ферромагнитного порошка, обладающего большой остаточной индукцией и коэрцитивной силой;

2) контролируемое изделие намагничивается, в результате чего в местах залегания пороков возникают местные магнитные поля рассеяния, которые фиксируются на ферромагнитной пленке. Каждый элемент пленки, соприкасающийся с контролируемым швом, при наличии в нем пороков получает различную остаточную намагниченность. Наибольшая намагниченность возникает на участках пленки, соответствующих местам расположения наибольших пороков шва;

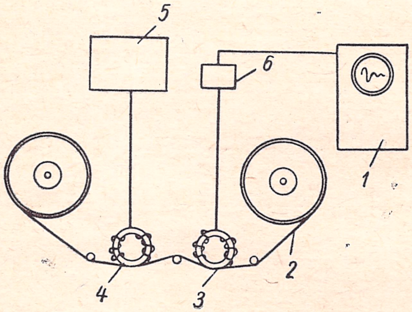
3) после намагничивания пленка пропускается через воспроизводящее устройство, аналогичное устройству для магнитной звукозаписи, в котором имеются магнитная головка воспроизведения и магнитная головка стирания.

При прохождении пленки через магнитную головку воспроизведения магнитное поле, зафиксированное на пленке, будет пронизывать сердечник головки, вызывая в ее обмотке э. д. с. Эта э. д. с. после усиления попадает в электронный осциллограф,

на экране которого появляются импульсы, по форме и величине которых и судят о характере порока.

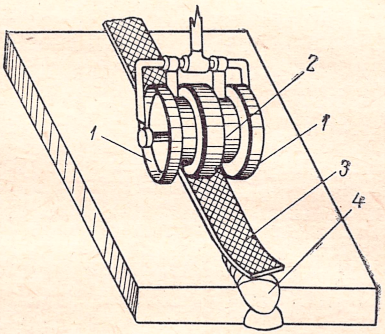
Воспроизведение «записи» осуществляется с помощью воспроизводящего устройства ВУМД-3 или стандартной головки В-02, через которые лента протягивается в продольном направлении прерывисто со скоростью 129,5 *м/час*. Принципиальная схема воспроизведения представлена на фиг. 46 [50].

Кроме того, дефектоскоп имеет индикатор недопустимых пороков в виде неоновой лампы, которая загорается при определенных размерах пороков.



Фиг. 46. Принципиальная схема воспроизведения пороков, зафиксированных на ферромагнитную пленку:

1 — электронный осциллограф; 2 — пленка; 3 — головка воспроизведения; 4 — головка стирания записей; 5 — генератор стирания записей; 6 — усилитель.



Фиг. 47. Дисковый электромагнит для «записи» пороков на пленку:

1 — железные диски; 2 — текстолитовый диск; 3 — ферромагнитная пленка; 4 — контролируемый шов.

Стирание магнитных полей с намагниченной пленки осуществляется высокочастотным генератором, питающим головку стирания, через которую протягивается пленка.

Намагничивание контролируемых прямолинейных стыковых швов производится дисковым электромагнитом ДМ-59, состоящим из железного сердечника, на концах которого расположены два железных диска; в центре сердечника между двумя обмотками укреплен текстолитовый диск с резиновым ободом для плотного прижатия пленки к шву (фиг. 47). Источником питания электромагнита могут быть выпрямитель, сварочный генератор и батарея аккумуляторов напряжением 24 *в*.

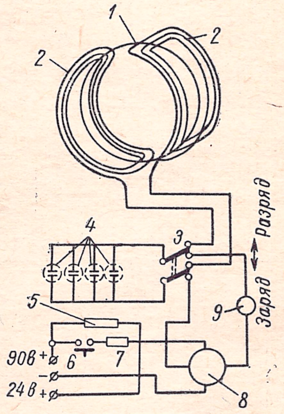
В процессе контроля электромагнит перемещают со скоростью 5—6 *м/мин*.

При контроле стыковых соединений труб намагничивание осуществляется импульсным разрядом батареи конденсаторов емкостью до 1000 *мф* на соленоид, охватывающий стык трубы по всему периметру шва. В данном случае сердечником электромагнита является металл контролируемой трубы.

Намагничивание в обоих случаях получается поперечным, в силу чего магнитографическим методом хорошо обнаруживаются такие внутренние пороки сварных соединений, как продольные трещины, непровары и т. п. Поперечные трещины, а также одиночные газовые и шлаковые включения сферической формы этим методом выявляются плохо.

На фиг. 48 представлена схема устройства для импульсного намагничивания в дефектоскопе ВНИИстройнефть. В схеме батарея конденсаторов заряжается от умформера, а затем мгновенно разряжается на обмотку электромагнита.

Дефектоскопы с дисковыми электромагнитами типа ДМ-59 рекомендуется использовать для контроля стыковых швов при толщине их до 12 *мм*. При больших толщинах требуется более мощный дисковый электромагнит, что приводит к увеличению размеров и веса последнего, к громоздкости и недостаточной портативности дефектоскопа.



Фиг. 48. Схема импульсного намагничивания в дефектоскопе ВНИИстройнефть:

1 — сварной шов стыка трубы; *2* — катушка намагничивания трубы; *3* — переключатель заряда — разряда; *4* — батарея электролитических конденсаторов общей емкостью до 1000 *мф*, 300 *в*; *5* и *7* — сопротивления по 36 *ом*; *6* — кнопочный выключатель; *8* — умформер РУ-11; *9* — миллиамперметр.

11. УЛЬТРАЗВУКОВАЯ ДЕФЕКТОСКОПИЯ СВАРНЫХ ШВОВ И СОЕДИНЕНИЙ

Природа ультразвуковых волн, их свойства и законы распространения

Ультразвуковые волны (УЗВ)[1] представляют собой упругие колебания материальной среды с частотой от 20 *кгц* и выше. Колебания с такой частотой лежат за пределами звуков, воспринимаемых человеческим ухом, а поэтому они называются ультразвуковыми. Проф. С. Я. Соколову удалось получать УЗВ с частотой колебаний $f = 10^9$ *гц*.

УЗВ могут распространяться в твердых, жидких и газообразных веществах, вызывая колебания частиц этих веществ. Скорость распространения УЗВ зависит от той среды, в которой они распространяются, и прежде всего от упругих свойств этой среды, ее плотности и типа УЗВ.

По своему типу УЗВ разделяются на продольные, поперечные и поверхностные.

Продольными УЗВ называются такие, направление которых параллельно перемещению колеблющихся частиц среды.

[1] В настоящей книге далее использовано сокращенное обозначение ультразвуковых волн — УЗВ.

Поперечными УЗВ называются такие, направление распространения которых перпендикулярно направлению перемещения колеблющихся частиц среды.

Поверхностные УЗВ — такие, которые распространяются только по поверхности среды.

В твердых средах встречаются все типы волн. Скорость распространения продольных волн примерно в два раза быстрее, чем поперечных, и для неограниченных твердых сред может быть определена по уравнению.

$$C=\sqrt{\frac{E}{\varrho}\cdot\frac{1-\mu}{(1+\mu)(1-2\mu)}},$$

где E — модуль Юнга;

μ — коэффициент Пуассона;

ϱ — плотность среды.

Скорости распространения УЗВ в некоторых безграничных средах и другие величины приведены в табл. 5.

Таблица 5

Скорость распространения продольных ($C_{пр}$), поперечных ($C_{поп}$) и поверхностных ($C_{пов}$) УЗВ в различных безграничных средах, а также плотность (ϱ) и удельное волновое сопротивление (ϱC) этих сред[1]

Среда	$C_{пр}$	$C_{поп}$	$C_{пов}$	ϱ в $Г/см^3$	$\varrho C_{пр}$ в $Г/см^2\,сек$
	в м/сек				
Алюминий	6 260	3 080	2 800	2,7	1 700 000
Бериллий	12 500	7 200	—	1,85	2 200 000
Железо	5 850	3 230	3 060	7,7	4 560 000
Никель	5 630	2 960	—	8,8	4 950 000
Медь	4 700	2 260	2 100	8,9	4 180 000
Латунь	4 430	2 120	2 000	8,1	3 610 000
Магний	4 600	2 200	—	1,7	780 000
Олово	3 320	1 670	—	7,3	2 420 000
Свинец	2 160	700	660	11,4	2 460 000
Титан	6 000	3 500	—	4,5	2 700 000
Вольфрам	5 460	2 620	—	19,1	10 420 000
Кварц по оси X	5 390	—	—	2,6	1 400 000
Резина	1 480	—	—	0,9	140 000
Органическое стекло	2 250	—	—	1,18	300 000
Трансформаторное масло	1 400	—	—	0,9	125 000
Вода	1 490	—	—	1,0	149 000
Воздух	335	—	—	$1{,}3\cdot10^{-3}$	43

[1] Дефектоскопия металлов, Сб. статей под ред. Д. С. Шрайбера, Оборонгиз, 1959.

Установлено, что от частоты колебаний УЗВ и скорости их распространения зависит длина волны,

$$\lambda = \frac{C}{f},$$

где C — скорость распространения УЗВ.
f — частота колебаний в *гц*.

В ультразвуковой дефектоскопии сварных швов и соединений используются УЗВ от плоских источников круглой формы с диаметром от 10 до 20 *мм*. В этом случае в среде распространяются плоские УЗВ, т. е. такие, в которых траектории частиц среды являются прямыми линиями.

Следовательно, УЗВ распространяются прямолинейно и могут быть направлены в среду узким пучком (сечение которого вначале равно площади поверхности источника УЗВ), распространяющимся на расстоянии l без расширения. Это расстояние

$$l = \frac{R}{\lambda},$$

где R — радиус источника излучения;
λ — длина УЗВ.

В дальнейшем, пройдя расстояние l, пучок несколько расширяется.

Величина расширения изменяется в зависимости от отношения длины УЗВ к диаметру излучающей пластинки по следующему закону:

$$\sin A = 1{,}2\frac{\lambda}{D},$$

где D — диаметр излучателя;
A — равно половине угла раствора конуса ультразвукового пучка.

Чем выше частота колебаний, тем меньше угол раствора пучка, тем выше направленность УЗВ при их распространении в среде.

При переходе из среды с одними акустическими свойствами в другую УЗВ частично отражаются от границы раздела этих сред, а частично проходят, преломляясь, из одной среды в другую. Способность УЗВ отражаться от границ раздела двух сред с различными акустическими свойствами и используется для выявления внутренних пороков в сварных швах и соединениях.

УЗВ, падающие на поверхность нормально, отражаются обратно в том же направлении, т. е. в данном случае угол между падающими и отраженными УЗВ равен нулю.

УЗВ, падающие на поверхность под углом к ней, отражаются по тем же законом, что и свет, т. е. угол падения равен углу отражения.

Коэффициент отражения УЗВ от поверхности раздела двух сред с различными акустическими свойствами может изменяться в пределах от 0 до 1. При $K = 0$ отражения нет, т. е. вся энергия ультразвуковых колебаний переходит из одной среды в другую. При $K = 1$ имеет место полное отражение от границы раздела сред (табл. 6).

Таблица 6

Коэффициент отражения УЗВ (для отраженной энергии) при перпендикулярном падении на границу двух безгранично протяженных сред (в %)

Сталь	Алюминий	Сталь	Никель	Магний	Медь	Латунь	Свинец	Кварц	Органическое стекло	Резина	Вода	Трансформаторное масло	Воздух
Алюминий	0	21	24	9	18	14	3	0,3	50	72	72	74	100
Сталь . . .	—	0	0,2	43	0,3	1	9	27	77	88	88	89	100
Никель . .	—	—	0	47	0,8	2	12	29	79	89	89	90	100
Магний . .	—	—	—	0	40	36	20	8	27	54	54	58	100
Медь . .	—	—	—	—	0	0,2	7	22	75	87	87	88	100
Латунь . .	—	—	—	—	—	0	5	16	73	86	86	87	100
Свинец . .	—	—	—	—	—	—	0	8	62	79	79	80	100
Кварц . . .	—	—	—	—	—	—	—	0	46	68	68	71	100
Органическое стекло . .	—	—	—	—	—	—	—	—	0	12	12	17	100
Резина . .	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0	0	0,6	100
Вода . . .	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0	0,6	100
Трансформаторное масло	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0	100
Воздух . .	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	0

В общем виде коэффициент отражения УЗВ по амплитуде колебаний на границе раздела двух сред при нормальном падении определяется по уравнению

$$K_a = \frac{\varrho_1 C_1 - \varrho_2 C_2}{\varrho_1 C_1 + \varrho_2 C_2},$$

где ϱ_1 и ϱ_2 — плотность сред;

C_1 и C_2 — скорость распространения звука в этих средах;

$\varrho_1 C_1$ и $\varrho_2 C_2$ — удельные волновые, или акустические, сопротивления сред.

Доля отраженной энергии будет тем больше, чем больше разница удельных сопротивлений сред. Так, например, при переходе ультразвуковой волны из воздуха в твердую среду (железо

практически отразится 100% энергии, потому что $\varrho_1 C_1$ для воздуха равно 43 *Г/см² сек*, а $\varrho_2 C_2$ для железа — 4 560 000 *Г/см² сек.*

Благодаря этому свойству УЗВ, введенные в металл, достигнув непровара, трещины или раковины, не преодолевают такие препятствия и почти полностью отражаются; это свойство УЗВ и лежит в основе метода ультразвуковой дефектоскопии.

При распространении в металлах УЗВ теряют свою интенсивность по следующему закону:

$$I = I_0 e^{-2\alpha\delta},$$

где I_0 — интенсивность УЗВ в начальной точке;

I — интенсивность УЗВ после прохождения металла толщиной δ;

e — основание натуральных логарифмов, равное 2,7;

α — линейный коэффициент поглощения, зависящий от частоты колебаний и от структуры металла.

Потеря интенсивности является результатом рассеяния УЗВ в той среде, в которой они распространяются, и поглощения их той же средой.

В случае однородной среды поглощение УЗВ зависит от ее вязкости и теплопроводности. С увеличением неоднородности в металле поглощение УЗВ возрастает.

Способы получения ультразвуковых волн

Для получения УЗВ при дефектоскопии сварных швов и соединений используют пьезоэлектрический эффект. Применяют обычно пьезоэлектрические пластинки, изготовляемые из монокристаллов кварца, сегнетовой соли, титанита бария и др. В настоящее время широко используют искусственно изготовленные пластинки из титанита бария ($BaTiO_3$), вставляемые в плоские или призматические держатели, называемые щупами.

Пьезоэлектрический эффект заключается в том, что если такую пластинку в щупе подвергать механическому сжатию или растяжению в определенном направлении, то на поверхности ее возникают электрические заряды, изменяющие свой знак в зависимости от того, какое усилие (растяжение или сжатие) действует на пластинку. Это явление называется прямым пьезоэлектрическим эффектом.

Обратный пьезоэлектрический эффект характеризуется тем, что пьезоэлектрическая пластинка, внесенная в электрическое поле, изменяет свои размеры в соответствии с напряженностью и направлением этого поля. Изменение отвечает следующему уравнению:

$$\Delta X = \delta V$$

где δ — пьезоэлектрический модуль, показывающий величину приращения размеров пластинки при разности потенциалов в 1 *в*, приложенной к граням пластинки;

V — приложенное полное напряжение.

Переменное электрическое поле, приложенное к пластинке, вызывает в ней механические колебания с частотой приложенного поля. Эти колебания передаются в окружающую среду и распространяются в ней в виде упругих колебаний с той же частотой, какая приложена к пластинке.

В том случае, когда ультразвуковые колебания, возникающие в пьезоэлектрической пластинке, проходят через какую-то среду и попадают на другую пьезоэлектрическую пластинку, в которой под действием механических колебаний среды возникают пьезоэлектрические заряды. Эти заряды могут быть поданы на усилитель и воспроизведены индикатором.

На указанном свойстве пьезоэлектрического эффекта и основана ультразвуковая дефектоскопия сварных швов и соединений. В данном случае пьезоэлектрические заряды, возникающие на приемной пьезоэлектрической пластинке, усиливаются посредством лампового усилителя и передаются на индикатор, представляющий собой электронно-лучевую трубку или другое устройство в виде прибора со стрелкой, позволяющего зафиксировать разность потенциалов пьезоэлектрических зарядов.

Итак, для создания в среде ультразвуковых колебаний на пьезоэлектрическую пластинку подают переменное электрическое поле обычно с частотой, равной частоте собственных колебаний пластинки, т. е. в резонанс. Вследствие этого амплитуда колебаний пьезоэлектрической пластинки возрастает, а вместе с тем увеличивается и механическая мощность ультразвуковых колебаний, отдаваемая в металл.

Резонансную частоту колебаний пьезоэлектрической пластинки из титанита бария можно определить из следующего уравнения:

$$f_{рез} = \frac{2{,}85 \cdot 10^6}{\delta} \ гц,$$

где δ — толщина пластинки в *мм*, откуда

$$\delta_{рез} = \frac{2{,}85 \cdot 10^6}{f_{рез}} \ мм.$$

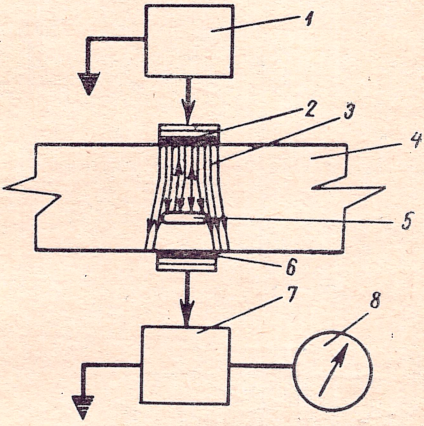
Механическая мощность ультразвуковых колебаний, отдаваемая в среду, в которой находится пластинка титанита бария, пропорциональна площади пластинки и квадрату амплитуды. Таким образом, чтобы получить большую механическую мощность ультразвуковых колебаний, надо иметь больший размер пьезоэлектрических пластинок. Однако увеличение площади пластинок приводит к тому, что в процессе колебаний они разрушаются. Поэтому практически применяют пластинки с площадью 2—2,5 *см*^{2}; при этом прикладывается напряжение 2000—3000 *в* на 1 *мм* толщины пластинки.

Ультразвуковые дефектоскопы и принципы их работы

В практике находят применение различные ультразвуковые дефектоскопы. Например, имеются дефектоскопы, работающие по так называемому методу звуковой тени.

Сущность этого метода заключается в следующем.

Переменное электрическое поле, создаваемое высокочастотным ламповым генератором *1* (фиг. 49), прикладывается к пьезоэлектрической пластинке *2*, которая плотно прилегает к поверхности контролируемого изделия *4*. Под действием электрического поля в пластинке возникают механические колебания с частотой приложенного поля, которые в виде упругих колебаний передаются частицам среды контролируемого изделия.



Фиг. 49. Общая каскадная схема ультразвукового дефектоскопа, работающего по методу звуковой тени:

1 — высокочастотный генератор; *2* — передающая пьезоэлектрическая пластинка; *3* — пучок ультразвуковых волн; *4* — контролируемое изделие; *5* — порок внутри изделия; *6* — приемная пьезоэлектрическая пластинка; *7* — приемный усилитель; *8* — индикатор.

При отсутствии пороков внутри изделия эти колебания попадают на приемную пьезоэлектрическую пластинку. Приемная пластинка также начинает колебаться, в результате чего на ее поверхности возникают пьезоэлектрические заряды, создающие разность потенциалов на обкладках пластинки. Указанная разность потенциалов попадает на усилитель *7*, а оттуда на индикатор *8*.

Если же на пути УЗВ встречается препятствие в виде какого-либо внутреннего порока, то часть УЗВ (в зависимости от размеров порока), введенных в контролируемое изделие, отражается от порока и не попадает на приемную пластинку. Другая же часть УЗВ, попав на приемную пластинку, обнаруживается индикатором, в данном случае интенсивность УЗВ будет ниже по сравнению с интенсивностью УЗВ, прошедших через изделие без пороков.

Таким образом, порок, встречающийся на пути УЗВ, препятствует их распространению, создавая звуковую тень, почему метод и называется теневым.

Если порок в изделии незначителен и по своим размерам соизмерим с длиной УЗВ, то он может быть вообще не обнаружен.

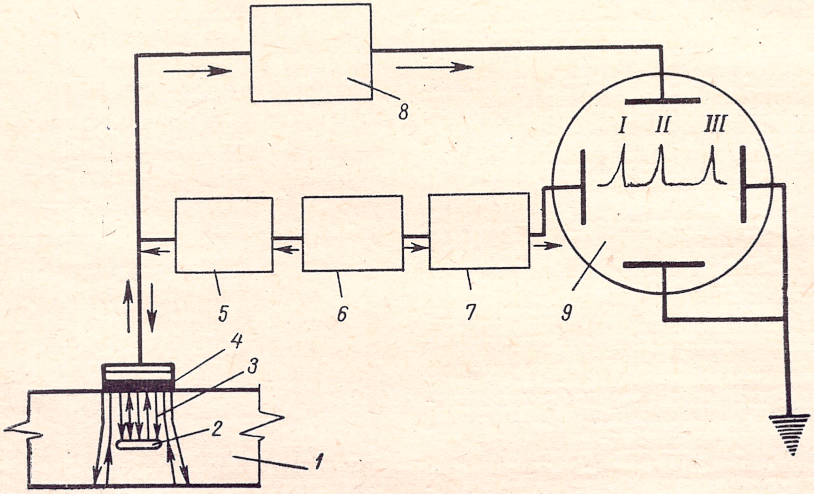
Следует отметить, что при контроле по методу звуковой тени необходимо:

1) обеспечить доступ к обеим сторонам контролируемого объекта;

2) подготовить поверхность контролируемого объекта с обеих сторон для обеспечения хорошего акустического контакта;

3) обеспечить непрерывное излучение ультразвуковой энергии в контролируемый объект в течение всего времени контроля.

Первый ультразвуковой дефектоскоп, работающий по методу звуковой тени, был разработан проф. С. Я. Соколовым в 1928 г.



Фиг. 50. Каскадная схема импульсного ультразвукового дефектоскопа при работе с одним щупом:

1 — контролируемое изделие; *2* — порок внутри изделия; *3* — пучок ультразвуковых волн; *4* — передающий и приемный щуп; *5* — импульсный генератор; *6* — задающий генератор; *7* — генератор развертки; *8* — приемный усилитель; *9* — экран электронной трубки.

В дальнейшем в связи с развитием радиолокации был предложен другой дефектоскоп, работающий по методу импульсной подачи УЗВ.

Импульсные ультразвуковые дефектоскопы работают по следующему принципу. На пьезоэлектрическую пластинку — щуп (фиг. 50) от импульсного генератора подается кратковременный (1—5 *мксек*) электрический импульс, после чего наступает пауза (длительностью в несколько десятков *мксек*), а затем снова следует импульс, сменяемый паузой, и т. д. Электрический импульс, поданный на щуп, превращается в ультразвуковые волны, которые частично проходят в материал контролируемого изделия, а частично отражаются от поверхности раздела и попадают на тот же щуп (ставший в момент паузы приемным) или на другой приемный щуп, расположенный с той же стороны, что и передающий. Отраженные УЗВ, попавшие на щуп, снова

превращаются в электрическую энергию, которая после усиления попадает на электронно-лучевую трубку и на экране последней фиксируется в виде начального (первого) импульса-сигнала, обозначенного на фиг. 50 цифрой *I*.

Та часть УЗВ, которая была введена в материал контролируемого изделия, при встрече с внутренним пороком в материале частично отражается от границы раздела двух сред и так же, как в предыдущем случае, снова попадает на щуп и фиксируется на экране электронно-лучевой трубки в виде второго импульса-сигнала, обозначенного на фиг. 50 цифрой *II*.

И, наконец, часть УЗВ, прошедшая через всю толщину изделия, отражается и фиксируется на экране в виде третьего импульса, называемого донным сигналом и обозначенного цифрой *III*.

Когда в контролируемом изделии нет никаких пороков, на экране фиксируются или два сигнала — начальный и донный (при условии отражения УЗВ от дна) или только один — начальный (если УЗВ, отражаясь под углом, уходят, не возвращаясь в передающий щуп, ставший приемным).

Современные ультразвуковые дефектоскопы позволяют определить не только наличие порока в сварных швах и соединениях, но и его протяженность и глубину залегания.

Наиболее распространенным ультразвуковым импульсным дефектоскопом является весьма компактный УЗД-7Н (разработан в ЦНИИТмаш), передняя панель которого представлена на фиг. 51.

Основные параметры этого дефектоскопа следующие:

1) габаритные размеры 220 × 360 × 425 *мм*;

2) питание — сеть переменного тока 110; 127 и 220 *в*;

3) вес 16 *кГ*;

4) рабочая частота 0,8 и 2,5 *Мгц*;

5) максимальная глубина прозвучивания для стали:

а) при пользовании плоскими щупами — не менее 2 *м*;

б) при пользовании призматическими щупами — не менее 1 *м*;

6) минимальная глубина прозвучивания для стали (мертвая зона):

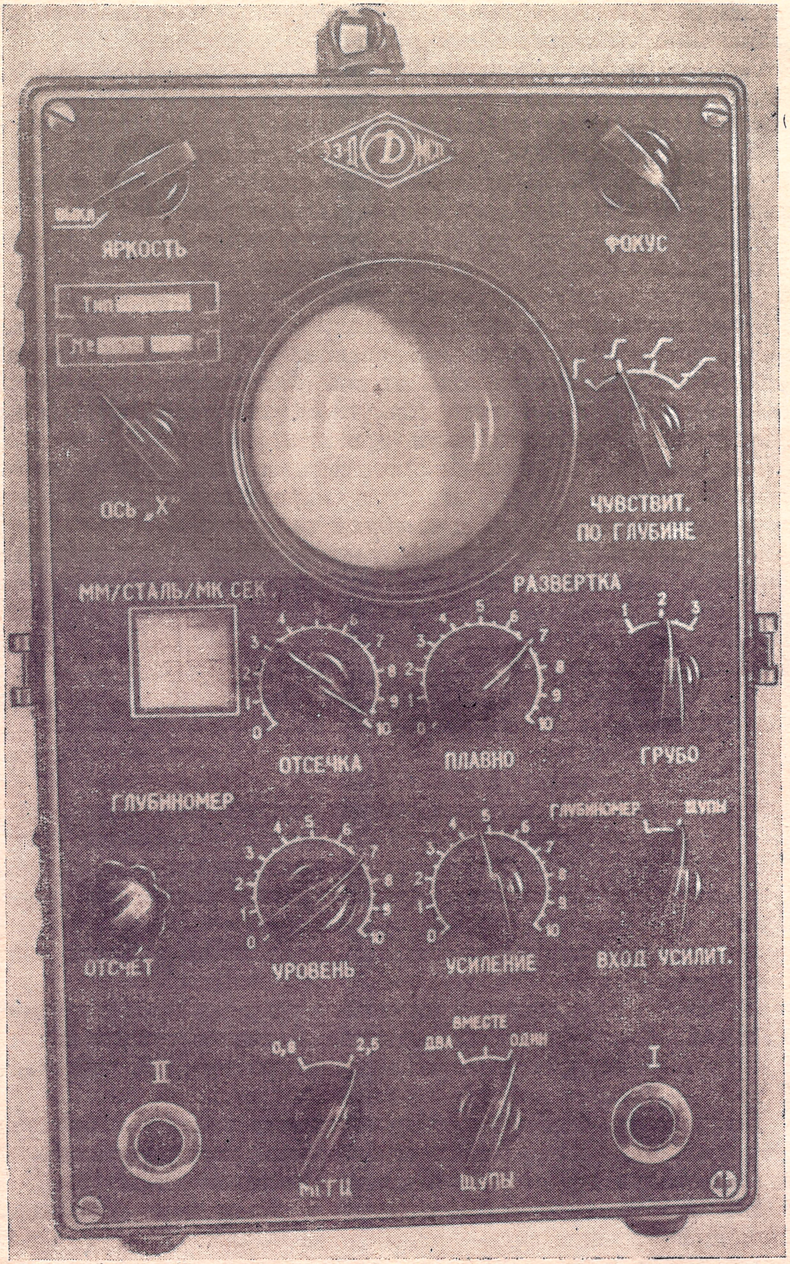
а) при пользовании плоскими щупами на рабочей частоте 2,5 *Мгц* — 10 *мм*;

б) при пользовании призматическими щупами на рабочей частоте 2,5 *Мгц* — 0 *мм* (т. е. мертвая зона отсутствует);

в) при пользовании плоскими щупами на рабочей частоте 0,8 *Мгц* — 22 *мм*.

Дефектоскоп снабжен ультразвуковым эталоном времени — глубиномером, позволяющим непосредственно отсчитывать глубину залегания дефектов или полную толщину изделия.

Минимальные пределы измерения толщины стального изделия с помощью глубиномера — от 10 до 2000 *мм*. Шкала прямого отсчета имеет градуировку от 7 до 400 *мм* для стали и градуировку от 2 до 60 *мксек*.



Фиг. 51. Передняя панель дефектоскопа УЗД-7Н.

Для контроля больших толщин в ЦНИИТмаш разработан специальный ультразвуковой дефектоскоп — УДЦ-10, имеющий 4 рабочих частоты: 0,8; 1,2; 1,8; 2,5 *Мгц*. Дефектоскоп снабжен специальной сигнальной лампочкой (помещенной в корпус щупа), которая загорается при обнаружении порока, что значительно облегчает работу оператора.

По габаритам и весу УДЦ-10 меньше, чем УЗД-7Н. Чувствительность УДЦ-10 в 3—6 раз выше, чем УЗД-7Н[1].

Большой интерес представляет импульсный дефектоскоп УЗД-НИИМ-2, разработанный в НИИмостов при Ленинградском институте инженеров железнодорожного транспорта.

Дефектоскоп используется для выявления различных пороков в металле и сварных соединениях без снятия усиления и без предварительной механической обработки поверхности проката.

Дефектоскопом выявляются пороки с минимальной эквивалентной площадью (площадью порока в плоскости, перпендикулярной направлению УЗВ) порядка 2 *мм*^{2} при частоте ультразвуковых колебаний — 2,5 *Мгц*. При наличии в контролируемом изделии пороков появляются импульсы на экране электронно-лучевой трубки, звук в телефонных наушниках и зажигается сигнальная лампочка, вмонтированная в корпус щупа.

Дефектоскоп снабжен глубиномером со шкалой прямого отсчета глубины залегания пороков. Размеры дефектоскопа $340 \times 320 \times 220$ *мм*; вес 6 *кг*. Питание дефектоскопа производится от выпрямителя. Необходимое напряжение питающей сети 127 и 220 *в* при частоте 50 *гц*.

Дефектоскоп допускает работу по однощуповой, двухщуповой и однодвухщуповой схеме.

Заслуживает внимания УЗД-НИИМ-5, работающий по однощуповой схеме на частотах 1,8; 2,5 и 3,2 *Мгц*, обеспечивающий возможность выявления внутренних пороков и мест их залегания в сварных швах при эквивалентной площади дефектов примерно 2 *мм*^{2} и глубине залегания от 6 до 500 *мм*.

Дефектоскоп оборудован электронным глубиномером. Величина контролируемого слоя регулируется в пределах $8 \div 500$ *мм*. Наличие порока вызывает изменение импульса на экране электронно-лучевой трубки, приводит к зажиганию лампочки и появлению звука в телефонных наушниках. Специальное приспособление позволяет осуществить автоматический контроль с записью результатов. Прибор питается от сети переменного тока или от аккумуляторной батареи.

Вес прибора с блоком питания примерно 11,5 *кГ*.

Для работы в полевых условиях при монтаже мостов сконструирован портативный ультразвуковой дефектоскоп типа

[1] И. Н. Ермолов, Контроль качества массивных сварных соединений различных типов ультразвуковым методом, Сб. трудов конференции, Методы контроля качества сварных швов и конструкции, НТО Машпром, 1958.

УЗД-НИИМ-3. Особенностями этого дефектоскопа являются малые размеры 80 × 250 × 275 *мм* и малый вес — около 4 *кГ* (без блока питания, который весит около 7 *кГ*). Источником питания могут быть две аккумуляторные батареи по 6 *в* или сеть переменного тока 127, 220 *в* при частоте 50 *гц*.

Принцип работы УЗД-НИИМ-3 аналогичен принципу работы УЗД-НИИМ-2.

Факторы, определяющие чувствительность ультразвукового метода

Чувствительностью ультразвукового метода контроля считается возможность четкого выявления минимальных по площади пороков, расположенных на заданной глубине контролируемого объекта. Чувствительность метода зависит от многих факторов, и в частности от частоты УЗВ, угла их ввода в контролируемое изделие, чистоты поверхности последнего, структуры шва и основного металла, глубины залегания порока, характера и расположения порока по отношению к направлению УЗВ и т. д.

Повышение частоты ультразвуковых колебаний способствует повышению чувствительности, т. е. выявлению незначительных пороков, так как в данном случае меньше сказывается дифракционные явления (огибание ультразвуковыми волнами малых пороков). Однако следует помнить, что с увеличением частоты колебаний на распространение УЗВ в сильной степени начинает сказываться влияние структуры основного и наплавленного металла, в результате чего могут появляться ложные сигналы, отраженные от структуры металла.

Таким образом, для выявления мельчайших пороков в сварных соединениях следует повышать частоту ультразвуковых колебаний.

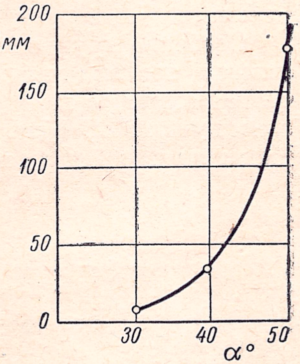
В случае необходимости выявления более крупных пороков рабочую частоту можно было бы понизить, но понижение частоты приводит к увеличению мертвой зоны прибора, т. е. увеличению толщины слоя, где контроль невозможен. Поэтому при контроле металла с мелкозернистой структурой для выявления только крупных недопустимых пороков рекомендуется снижать не рабочую частоту, а чувствительность дефектоскопа. Кроме того, необходимо отметить, что с повышением частоты ультразвуковых колебаний ухудшается их способность проникать через необработанную поверхность в толщу контролируемого металла. И, наконец, чем выше рабочая частота, тем сильнее поглощаются УЗВ в материале, в котором они распространяются.

Таким образом, правильный выбор рабочей частоты колебаний имеет чрезвычайно важное значение и является одним из факторов, определяющих чувствительность метода.

В дефектоскопии сварных швов и соединений используются частоты 0,8; 1,2; 1,8; 2,5; 3,5 *Мгц*.

С увеличением угла β наклона призматического щупа или угла α ввода колебаний в контролируемое изделие чувствительность ультразвукового метода контроля понижается. Наибольшая чувствительность, как установлено экспериментами [51], достигается при применении щупов с углом 30°. Увеличение угла до 40 и 50° приводит к резкому понижению чувствительности, что показано на фиг. 52.

Таким образом, для контроля толщины 200 *мм* и более следует применять щуп с возможно меньшим углом ввода пучка УЗВ, так как чем меньше этот угол, тем больше коэффициент полезного действия щупа.



Фиг. 52. Влияние угла наклона α призматического щупа на чувствительность ультразвукового метода при контроле сварного шва толщиной $\delta = 200$ *мм* дефектоскопом УЗД-7Н при частоте 2,5 *Мгц*.

С целью повышения чувствительности метода необходимо обеспечить надежный акустический контакт между щупом и поверхностью контролируемого объекта. Для этого с поверхности металла вдоль сварного соединения удаляют все брызги металла и шлака с тем, чтобы обеспечить свободное перемещение щупа. Вмятины, выпуклости и брызги препятствуют вводу УЗВ в толщу контролируемого металла вследствие наличия прослойки воздуха между щупом и поверхностью. Прослойка воздуха имеет место даже при тщательной подготовке поверхности. Поэтому подготовленную поверхность смазывают жидкостью (масло, автол, вода, мыльная пена), что улучшает акустический контакт и повышает чувствительность метода.

Выше уже отмечалось, что структура основного и наплавленного металла сказывается на чувствительности метода. Увеличение размеров зерен или кристаллитов металла шва и околошовной зоны ведет к повышению рассеяния и поглощения УЗВ.

Чрезвычайно сильно поглощаются УЗВ во многих аустенитных сталях, в сером чугуне, стальном литье и других металлах и сплавах, обладающих крупнозернистой структурой. В этих случаях приходится понижать рабочую частоту ультразвуковых колебаний, а следовательно, понижать чувствительность и разрешающую способность ультразвукового метода.

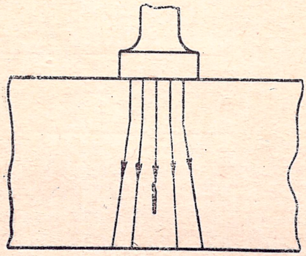
Чувствительность метода контроля ультразвуком понижается с увеличением глубины залегания порока в контролируемом объекте. Сказанное подтверждается техническими данными ультразвукового дефектоскопа УЗД-7Н, согласно которым этим прибором могут быть обнаружены следующие минимальные эквивалентные площади пороков:

а) на рабочей частоте ультразвуковых колебаний 2,5 *Мгц*: 2 *мм*^{2} на глубине до 200 *мм* и 6—8 *мм*^{2} на глубине до 500 *мм*;

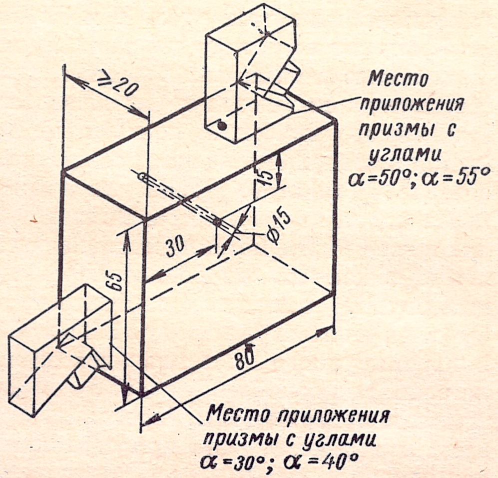
б) на рабочей частоте 0,8 *Мгц*: 20 *мм*^{2} на глубине до 200 *мм* и 60—80 *мм*^{2} на глубине до 500 *мм*.

Возможность выявления пороков в сварных швах и соединениях с помощью ультразвука зависит от характера этих пороков (единичные мелкие, объемные, плоские тонкие и т. п.), их размера (малой и большой протяженности), расположения относительно направления потока ультразвуковых колебаний.

Особенно трудно выявляются тонкие трещины, совпадающие с направлением пучка УЗВ (фиг. 53). Чем тоньше трещина в на-



Фиг. 53. Трудно выявляемый порок в виде тонкой трещины, совпадающей с направлением ультразвуковых колебаний.



Фиг. 54. Эталон из плексигласа для установления стандартной чувствительности ультразвукового дефектоскопа УЗД-7Н.

правлении УЗВ, тем более высокая рабочая частота требуется для ее выявления. Понижение частоты в этом случае снижает чувствительность метода настолько, что выявление подобных пороков становится невозможным.

Кроме рассмотренных выше причин, при прочих равных условиях, чувствительность метода зависит от квалификации оператора и его внимательности. При недостаточной квалификации или невнимательном отношении оператора к работе может быть допущено неправильное положение пьезощупа, недостаточное прижатие его к поверхности, неправильная смазка поверхности и другие нарушения, понижающие чувствительность метода.

Чувствительность дефектоскопа в процессе работы должна систематически проверяться по эталонным образцам с искусственными дефектами. Эталоны могут быть изготовлены из тех же материалов, которые подлежат контролю, и применение их рекомендуется обычно при выборе оптимальной частоты в зависимости от структуры металла сварного шва.

Для установления стандартной чувствительности ультразвукового дефектоскопа УЗД-7Н (соответствующей техническим данным, на рабочей частоте 2,5 *Мгц*) пользуются специальным эталоном из плексигласа, форма и размеры которого показаны на фиг. 54. В этом случае дефектоскоп включается по однощуповой схеме и работает в режиме максимальной чувствительности. Рукоятка «отсечка» (фиг. 51) установлена в положение, при котором наблюдается только начальный импульс и никаких ложных отражений нет.

Амплитуда импульса, отраженного от отверстия в эталоне, должна составлять на экране электронно-лучевой трубки не менее 15 *мм* на рабочей частоте 2,5 *Мгц*.

Для установления чувствительности дефектоскопа щуп накладывается на одну из граней эталона. Ориентировочное положение призматического щупа на эталоне в зависимости от угла ввода УЗВ показано на фиг. 54. Наличие на экране электронно-лучевой трубки дефектоскопа многократных отражений от противоположной стороны изделия служит одним из признаков достаточной чувствительности.

Поиск пороков обычно производят в режиме максимальной чувствительности. Как только порок обнаружен, для определения его эквивалентных размеров чувствительность дефектоскопа понижают.

Методика и примеры практического применения ультразвука для определения качества сварных швов и соединений

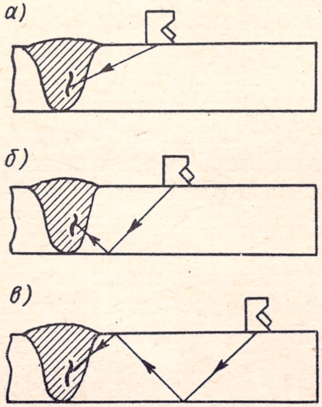
До начала контроля ультразвуком сварные швы и соединения контролируемого изделия подвергают внешнему осмотру для выявления наружных пороков и установления качества поверхности.

Все пороки, обнаруженные при внешнем осмотре, должны быть устранены, а брызги металла, шлак и другие загрязнения — тщательно удалены с поверхностей, прилегающих к контролируемым швам. Затем намечают участки, подлежащие контролю ультразвуком, и определяют направление прозвучивания.

В процессе контроля необходимо обеспечить прозвучивание всего объема металла, составляющего сварное соединение. Самым лучшим способом прозвучивания было бы прозвучивание плоскими щупами при введении ультразвуковых колебаний через наплавленный металл. Но так как сварные швы имеют так называемое «усиление», поверхность которого неровная и потому не обеспечивает необходимого акустического контакта, колебания вводятся через основной металл при помощи призматических щупов, позволяющих направлять УЗВ под различными углами.

Ультразвуковая дефектоскопия позволяет надежно выявить внутренние пороки, встречающиеся в сварных швах и соединениях. Исключение составляют пороки малых размеров в виде мелких

трещин, надрывов и одиночных включений, которые иногда недопустимы в сварных швах, но остаются необнаруженными в силу ряда причин и, в частности, в зависимости от принятой методики контроля, а потому разработке методики должно уделяться самое серьезное внимание. С этой целью необходимо перед контролем выяснить марку материала, из которого изготовлено изделие, возможный размер зерна структуры основного и наплавленного металла, качество поверхности контролируемого изделия, тип сварного соединения, толщину материала в изделии, вид подготовки под сварку и т. п.



Фиг. 55. Способы введения ультразвуковых колебаний в сварной шов: *а* — прямым пучком; *б* — однажды отраженным пучком; *в* — многократно отраженным пучком.

Угол ввода ультразвуковых колебаний выбирают таким, чтобы расстояние от щупа до шва было как можно меньшим, а направление УЗВ — возможно близким к нормальному по отношению к контролируемому сечению.

На фиг. 55 показаны возможные способы введения ультразвуковых колебаний в сварной шов. Следует отметить, что с увеличением многократности отражения УЗВ от поверхностей контролируемого объекта уменьшается интенсивность ультразвуковых колебаний, что в конечном итоге приводит к понижению чувствительности метода.

Ниже приведены рекомендации и примеры практического применения ультразвуковых колебаний для контроля различных сварных швов и соединений.

Стыковые сварные соединения контролируют методом отражений по однощуповой схеме призматическими щупами, как указано на фиг. 56, *а* [13].

Швы толщиной более 200 *мм* следует прозвучивать прямым пучком УЗВ с обеих поверхностей основного металла, в противном случае остается непроконтролированной «мертвая» зона в верхней части шва (фиг. 56, *б*) высотой h.

Швы толщиной от 20 до 200 *мм* целесообразно прозвучивать только с одной поверхности основного металла прямым и однажды отраженным пучком (фиг. 56, *в*). При этом угол ввода пучка УЗВ выбирают таким, чтобы его центральная ось в одном из положений щупа пересекала ось симметрии шва толщиной H на глубине 0,5 H. Величина этого угла определяется уравнением

$$\operatorname{tg} \alpha \geqslant \frac{b}{H} + \frac{2d}{H}$$

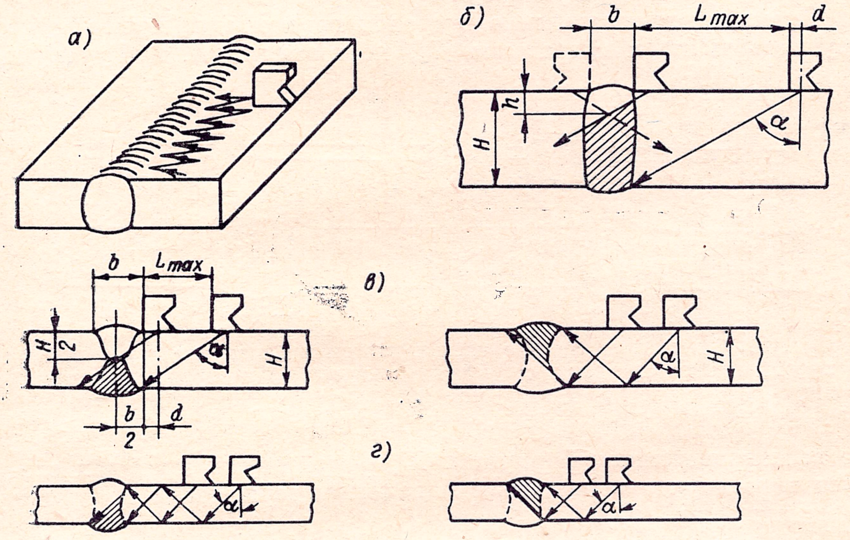
при прозвучивании прямым пучком;

и

$$\operatorname{tg} \alpha \geqslant \frac{b}{H}$$

при прозвучивании однажды отраженным пучком.

Для контроля стыковых швов толщиной от 8 до 20 *мм* рекомендуется угол ввода $\alpha = 65 \div 70^\circ$, что соответствует призматическому щупу с углом призмы 50°. В данном случае нижняя часть шва контролируется дважды отраженным пучком, а верхняя — однажды отраженным пучком УЗВ (фиг. 56, *г*).



Фиг. 56. Способы прозвучивания стыковых сварных швов.

Швы толщиной менее 8 *мм* могут быть проконтролированы многократно отраженным пучком, для чего максимальное число отражений пучка в основном металле до входа в шов можно определить по формуле

$$n_{\min} = \frac{d}{H \operatorname{tg} \alpha},$$

где n — число отражений;
d — расстояние от центра пучка УЗВ до передней грани щупа;
H — толщина контролируемого металла.

Зигзагообразное перемещение щупа, перпендикулярное оси шва, должно быть в пределах, необходимых для прозвучивания металла шва. Эти пределы устанавливают расчетом, пользуясь следующими формулами:

1) при прозвучивании шва прямым пучком

$$L_{\max} = H \operatorname{tg} \alpha - d;$$

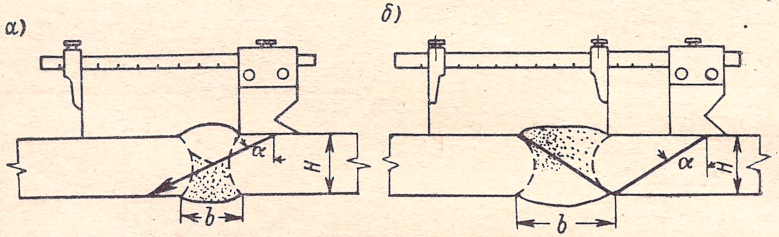
2) при прозвучивании шва однажды или многократно отраженным пучком

$$L_{min} = nH \operatorname{tg} \alpha - d;$$

$$L_{max} = (n+1) H \operatorname{tg} \alpha - d;$$

где n — число отражений ультразвукового пучка в металле;
H — толщина контролируемого металла;
d — расстояние от центра оси пучка УЗВ до передней грани щупа;
α — угол ввода пучка УЗВ.

Практически определение пределов перемещения щупов легко осуществить по номограммам [7], построенным А. К. Гурвичем



Фиг. 57. Схема держателя с ограничителем перемещения щупа при прозвучивании стыковых швов прямым лучом (*а*) и отраженным лучом (*б*).

по вышеприведенным формулам. Щуп в заданных пределах следует перемещать, пользуясь специальным держателем с ограничителями (фиг. 57).

Угловые сварные соединения контролируют ультразвуком также призматическими щупами; при этом рекомендуется [11, 13] вводить ультразвуковые колебания в шов через основной металл, как указано на фиг. 58.

Рекомендуется такой угол ввода УЗВ, при котором их направление было бы близким к нормали по отношению к сечению, где площадь порока максимальна. Прозвучивание металла шва с катетами κ_1 и κ_2 при толщине привариваемого листа δ может быть выполнено одним щупом с углом ввода α_1 или последовательно двумя щупами с углами ввода α_1 и α_2 (фиг. 59).

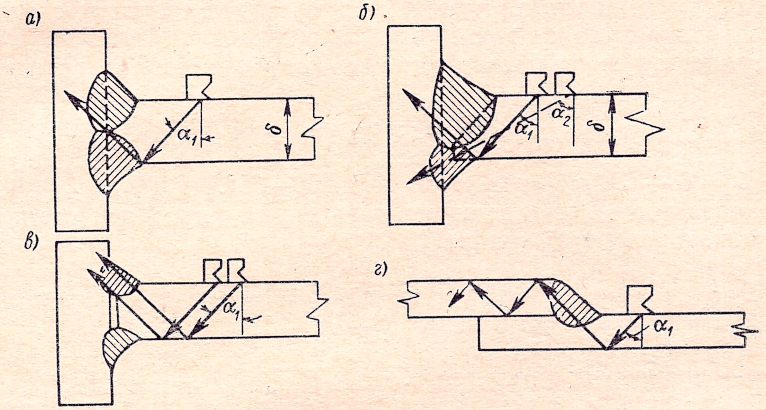
Угол α_1 определяется равенством

$$\operatorname{tg} \alpha_1 = \frac{\kappa_1}{\kappa_2}.$$

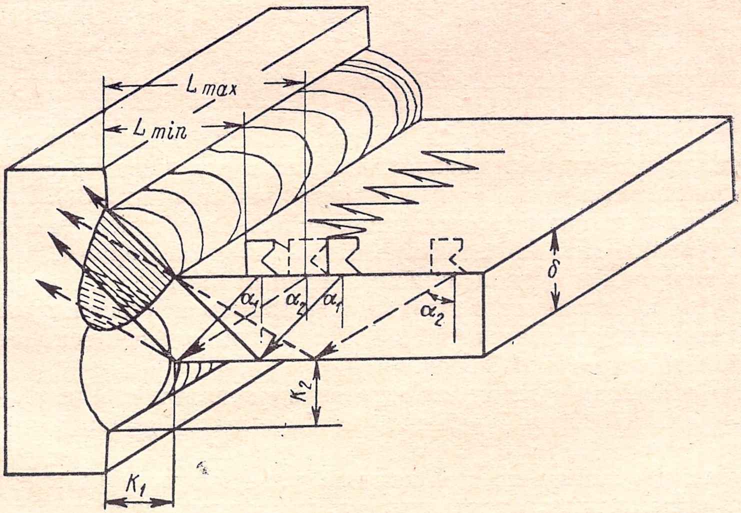
Обычно $\kappa_1 \approx \kappa_2$, а следовательно, $\alpha_1 \approx 45°$, что полностью обеспечивает прозвучивание углового шва, у которого

$$2\kappa_1 \leqslant \delta.$$

Последнее справедливо при $\delta \geqslant 30$ *мм*.



Фиг. 58. Схема введения ультразвуковых колебаний при контроле угловых швов: *а* — с К-образной разделкой и сквозным проваром; *б* — с V-образной разделкой и сквозным проваром; *в* — с несквозным проваром; *г* — внахлестку.



Фиг. 59. Схема перемещения щупа при контроле углового шва.

При $\delta < 30$ *мм* щупом с углом ввода пучка УЗВ $\alpha_1 = 45°$ прозвучивается только часть шва, заштрихованная на фиг. 59 сплошными линиями, другая же часть шва, заштрихованная пунктирными линиями, может быть прозвучена щупом с углом ввода ультразвука $\alpha_2 > \alpha_1$.

Оптимальную величину угла α_2 определяют из равенства

$$\operatorname{tg} \alpha_2 = \frac{2\kappa_1}{\delta}.$$

При $\delta = 8 \div 30$ *мм* этот угол равен 50—65°.

Пределы перемещения щупов перпендикулярно оси сварного шва находят по уравнениям

$$L_{\max} = 2\delta \operatorname{tg} \alpha_1 + \kappa_1 - d,$$
$$L_{\min} = \delta \operatorname{tg} \alpha_1 + \kappa_1 - d,$$

где d — диаметр пьезоэлемента.

Так же, как и при контроле стыковых швов, рекомендуется использовать держатель щупа с ограничителями [13].

Сварные швы внахлестку при толщине металла 8—20 *мм* следует контролировать однажды отраженными УЗВ, вводимыми в металл призматическим щупом с углом призмы 50° (фиг. 58, *г*). Как указано в [13], применение такого щупа позволяет выявить недопустимые пороки и уменьшает возможность появления эхо-сигналов от поверхности шва.

Сварные соединения, выполненные электрошлаковой сваркой, проверяют следующим образом.

1. Прозвучивают металл шва посредством призматических щупов с углом призмы, равным 30—40°, прямым пучком УЗВ.
2. При толщине шва до 200 *мм* для выявления пороков в верхней части шва следует производить его прозвучивание с другой стороны изделия или однажды отраженным пучком УЗВ.
3. При толщине шва, превышающей 200 *мм*, и невозможности проконтролировать его верхнюю часть с другой стороны, прозвучивают щупом с углом призмы, равным 50°.
4. Для контроля швов толщиной до 100 *мм* используют ультразвуковые колебания частотой 2,5 *Мгц*, швов большей толщины — колебания частотой 1,8 *Мгц*.
5. Перемещая щуп вдоль шва, поворачивают его на 10—15° от нормали к оси шва, для того чтобы выявить поперечные трещины.

Опытные данные по применению ультразвука для контроля швов, выполненных электрошлаковой сваркой, свидетельствуют о том, что этим методом надежно выявляют все виды внутренних пороков; нередко это единственно возможный метод контроля.

Сварные стыки труб успешно контролируют ультразвуком как в процессе строительства, так и эксплуатации паропроводов тепловых электростанций. Для контроля рекомендуется

использовать ультразвуковые колебания с частотой $f = 1{,}8$ *Мгц*, призматические щупы с углом призмы, равным 40°, и прозвучивание верхней части шва однажды отраженным и нижней части — дважды отраженным пучком УЗВ. Метод ультразвукового контроля позволяет выявлять различные недопустимые пороки, в том числе трещины и непровары, не обнаруживаемые гаммаграфированием.

Контроль аустенитных сварных швов отличается некоторыми особенностями. Как установлено [20], крупнокристаллическая структура наплавленного металла аустенитной стали вызывает сильное затухание ультразвуковых колебаний, что препятствует проникновению их в толщу металла и создает условия для появления ложных сигналов на экране электронно-лучевой трубки.

Ультразвуковые колебания с частотой 2,5 *Мгц* применимы для контроля аустенитных швов толщиной до 15 *мм*. Для контроля швов толщиной до 30 *мм* следует применять ультразвуковые колебания с частотой 1,8 *Мгц*.

Аустенизация (нагрев на 1050° и выдержка 2 часа) сильно увеличивает проникающую способность УЗВ. В связи с этим, пользуясь частотой 1,8 *Мгц*, можно контролировать шов толщиной до 100 *мм*.

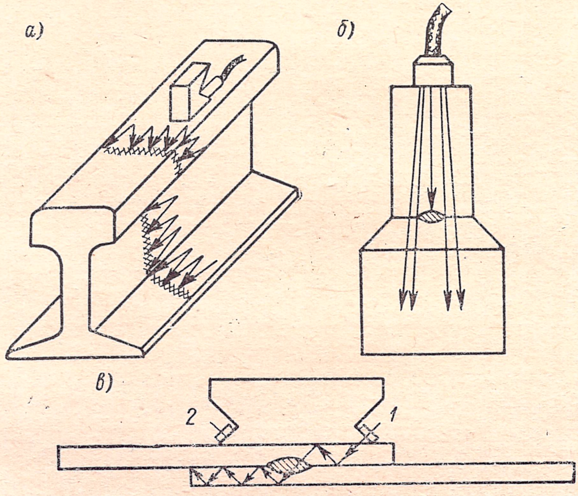
Снижая частоту колебаний до 0,8—0,6 *Мгц*, можно прозвучивать шов толщиной 40—45 *мм* без предварительной аустенизации, применяя при этом специальные призматические щупы.

Стыки рельсов, выполненные электрической контактной сваркой, успешно контролируют посредством УЗВ. Для этого используется дефектоскоп УЗД-НИИМ-5, причем для прозвучивания шейки и подошвы рельса применяют призматический щуп с углом призмы 50°, для головки — щупы с углом призмы 40 и 50° (фиг. 60, *а*). Признаком обнаружения порока является наличие эхо-сигнала от несплошности металла в зоне стыка. Такой стык бракуется.

Исследования [29] показали, что ультразвуковым методом в стыках рельсов выявляются трещины, непровары, расслоения, пережоги, поры и шлаковые включения.

Контроль стыковых соединений режущего инструмента, изготовленного при помощи электрической контактной сварки, может быть осуществлен ультразвуковым методом, для чего используют плоские щупы. При помощи таких щупов ультразвуковые колебания вводят в металл через торцовую поверхность хвостовой части инструмента [21], как показано на фиг. 60, *б*. При наличии в сварном стыке пороков на экране электронно-лучевой трубки появляются импульсы, по форме которых и судят о характере порока. Чувствительность дефектоскопа настраивается по эталону. Для контроля стыков режущего инструмента можно использовать любой импульсный дефектоскоп с частотой ультразвука 2,5—3 *Мгц*.

Качество сварных точек выполненных электрической контактной сваркой, может быть проконтролировано посредством ультразвука. Для этого применяется метод отражений по двухщуповой схеме, при котором используется специальный щуп с двумя пьезоэлементами (приемным и передающим). Ультразвуковые колебания, возникающие в элементе *1* (фиг. 60), распространяются в верхнем листе и через качественно сваренную точку попадают в нижний лист. В этом случае интенсивность

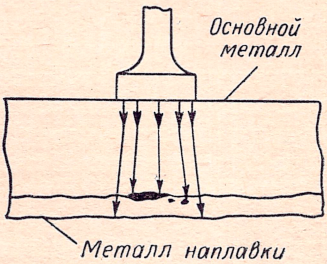


Фиг. 60. Схема прозвучивания изделий, выполненных контактной сваркой: *а* — стык рельса; *б* — стыковое соединение сварного инструмента; *в* — сварная точка.

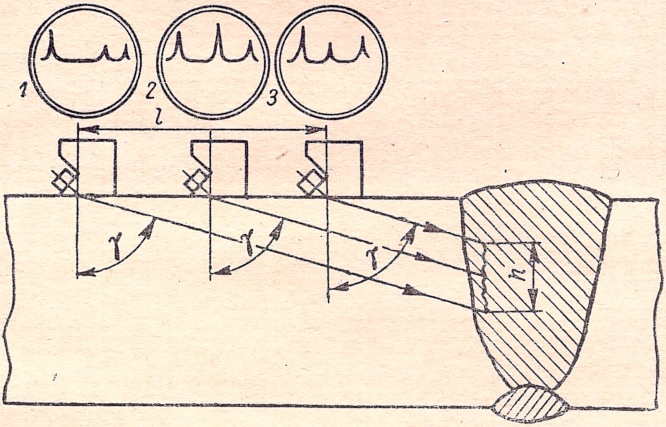
ультразвуковых колебаний, достигающих приемного элемента *2*, крайне мала. При наличии в сварной точке пороков интенсивность принимаемого сигнала резко возрастает, что и является показателем недоброкачественной точки. Контроль ультразвуком позволяет выявлять в сварной точке непровары, трещины и поры. Для контроля можно использовать любой импульсный дефектоскоп.

Качество наплавки, наличие в ней трещин, пор, шлаковых включений и несплавлений с основным металлом может быть определено при помощи ультразвуковой дефектоскопии. Для этого ультразвуковые колебания частотой 1,8—2,5 *Мгц* при помощи плоского щупа вводят в наплавку и зону сплавления через основной металл (фиг. 61). Пользуясь глубиномером, определяют глубину залегания порока, а зная толщину слоя основного и наплавленного металла, устанавливают, в какой части металла залегает порок.

С помощью ультразвуковых колебаний обнаруживают разнообразные пороки, встречающиеся в сварных швах и соединениях и имеющие различные размеры, глубину залегания и ориентировку. Определение их размеров, положения и протяженности является основной задачей дефектоскописта и во многом зависит от его опыта и квалификации. Однако существуют некоторые общие приемы определения размеров пороков. Например, протяженность развитых вертикальных трещин или непроваров находят по схеме, приведенной на фиг. 62. В данном случае призматическим щупом через основной металл вводят пучок УЗВ и перемещают щуп вдоль трещины (или непровара), все время выбирая такое положение, при котором импульс отраженного сигнала имеет максимальную амплитуду. В положениях *1* и *3* щупа на концах трещины отмечается падение амплитуды импульса отраженного сигнала по сравнению со всеми промежуточными положениями (подобными положению *2*). На основании полученных данных размер h принимается за высоту трещины в сечении шва.



Фиг. 61. Схема прозвучивания наплавки плоским щупом.



Фиг. 62. Метод определения протяженности трещин или непровара.

Протяженность трещины по глубине h находится из соотношения

$$h = l \operatorname{ctg} \gamma,$$

где γ — угол распространения пучка УЗВ в изделии.

В главе I было отмечено, что в ряде случаев техническими условиями, правилами и нормами на изготовление сварных конструкций

допускаются в сварных швах некоторые пороки. Например, при сварке стыков трубопроводов без применения подкладок и без провара 1-го прохода шва в среде аргона допускаются непровары в вершине шва глубиной до 15% от толщины стенки, если она не превышает 20 *мм*, но не свыше 3 *мм* при толщине 20 *мм*.

Ультразвуковым методом невозможно точно определить величину и род порока, например, непровар трудно отличить от трещины. Следовательно, или могут быть необоснованно забракованы сварные изделия, или допущены в эксплуатацию недоброкачественные конструкции. Поэтому контроль качества сварных изделий ультразвуком нередко является лишь предварительным.

Сочетание ультразвукового метода контроля с методом рентгено- и гаммаграфии в целом ряде случаев весьма целесообразно и желательно. При этом используют преимущественные стороны каждого из указанных методов. Например, единичные пороки в виде пор и шлаковых включений небольших размеров, а также тонкие трещины, лежащие в плоскости, совпадающей с направлением ультразвуковых колебаний, не могут быть выявлены ультразвуком, но зато хорошо обнаруживаются рентгено- и гаммаграфированием. Трещины и непровары, лежащие в плоскости, перпендикулярной к направлению потока рентгеновых и гамма-лучей, выявляются не просвечиванием, а методом ультразвуковой дефектоскопии. Таким образом, сочетание одного метода с другим взаимно дополняет друг друга, обеспечивая более полное выявление пороков.

Кроме того, в ряде случаев бывает необходимо:

1) посредством рентгено- и гаммаграфирования уточнить размеры и характер пороков, выявленных ультразвуком;

2) получить документ в виде рентгеновской пленки, объективно фиксирующий качество сварного соединения, что пока невозможно при ультразвуковой дефектоскопии.

3) проверить надежность и объективность контроля путем выборочного просвечивания швов, в которых по данным ультразвуковой дефектоскопии отсутствуют недопустимые пороки;

4) проконтролировать качество работы оператора при ультразвуковом контроле.

Нередко подвергают ультразвуковому контролю 100% швов, а затем применяют контроль рентгено- или гаммаграфированием тех участков швов, в которых ультразвуковой дефектоскопией обнаружены пороки. Этот прием позволяет не только расширить объем контроля и гарантировать более высокое качество сварных конструкций, но и снизить трудоемкость и время контроля [13].

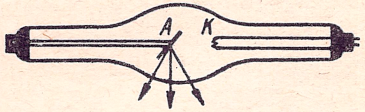
Формы применения метода ультразвуковой дефектоскопии в сочетании с методом гамма- и рентгенографирования обусловливаются типом сварных соединений, подвергающихся контролю, и техническими требованиями, предъявляемыми к их качеству, а также условиями производства.

12. КОНТРОЛЬ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ РЕНТГЕНОВЫМИ И ГАММА-ЛУЧАМИ

Природа рентгеновских лучей, их свойства и способы получения

Рентгеновы лучи — один из видов электромагнитных колебаний с длиной волны от 0,006 до 1000 Å. При распространении они не отклоняются от своего пути ни магнитными, ни электрическими полями, а следовательно, не несут электрического заряда.

Рентгеновы лучи получают в трубках, представляющих собой стеклянный сосуд с двумя впаянными электродами (фиг. 63), катодом K с вольфрамовой спиралью накала и анодом A, изготовленным целиком из вольфрама и меди, с впаянной вольфрамовой пластинкой. В сосуде рентгеновской трубки создан вакуум до $10^{-7} \div 10^{-8}$ *мм* рт. ст. Спираль катода подключается к специальному трансформатору накала напряжением 6—12 *в*, за счет чего она разогревается до ярко-светлого каления. К электродам рентгеновской трубки прикладывается высокое напряжение, достигающее в современных рентгеновских установках 200—400 *кв*, а в некоторых случаях (в специальных установках с резонансными трансформаторами) 2 млн. *кв*. Под действием высокого напряжения электроны, вылетающие с раскаленной спирали катода, ускоряются и с большой скоростью (доходящей до 240 тыс. *км/сек*) устремляются к аноду, при этом чем выше приложенное к рентгеновской трубке напряжение, тем большую скорость приобретают электроны и тем большей кинетической энергией они обладают. При ударе об анод электроны претерпевают резкое торможение и их кинетическая энергия возбуждает атомы в анодной пластине, в результате чего возникает электромагнитное излучение в виде рентгеновых лучей; бо́льшая же часть кинетической энергии превращается в тепловую, нагревающую анод.



Фиг. 63. Схема рентгеновской трубки.

Для предохранения анода от перегрева и расплавления применяют водяное или масляное охлаждение.

Чем выше напряжение, приложенное к трубке, тем меньше длина волны рентгеновых лучей. Вследствие малой длины волн ($10^{-8} \div 10^{-10}$ *см*) рентгеновы лучи обладают способностью проникать через непрозрачные тела, так как их длина сопоставима с расстояниями между атомами кристаллической решетки таких твердых тел, как металлы.

Рентгеновы лучи относятся к лучам невидимой части спектра, располагаются за ультрафиолетовыми лучами.

Рентгеновы лучи обладают следующими свойствами:

1) энергия лучей уменьшается при прохождении через вещество вследствие рассеяния — часть рентгеновых лучей меняет свое первоначальное направление, а также вследствие превращения их в другие виды энергии: электрическую, фотоэлектрическую, фотохимическую, тепловую и др. Рентгеновы лучи рассеяния понижают качество рентгенограммы, а поэтому для ослабления их действия применяют различные фильтры;

2) способность вызывать фотохимические реакции, т. е. воздействовать на бромистое серебро фотопленки, что позволяет фотографировать невидимые внутренние пороки сварных швов и соединений на рентгеновскую пленку и по фотоснимкам давать заключение о качестве. Это свойство широко применяют в дефектоскопии сварных швов, как имеющее наибольшее практическое значение;

3) способность вызывать флуоресценцию некоторых веществ, например, вольфрамата кальция ($CaWO_4$), вольфрамата кадмия ($CdWO_4$), сернистого кадмия (CdS), сернистого цинка (ZnS) и др. На этом свойстве основано применение усиливающих экранов для подсвечивания рентгеновской пленки, а также для визуального определения качества при получении результатов просвечивания без пленки — на экране;

4) способность ионизировать газы. Степень ионизации может быть установлена и измерена различными приборами, позволяющими определить силу ионизационного тока. На этом свойстве рентгеновых лучей основан ионизационный метод контроля;

5) способность оказывать физиологическое действие, вызывая различные (в зависимости от дозы излучения) биологические явления в живом организме;

6) возможность изменять проникающую способность в зависимости от длины волны. С уменьшением длины волны рентгеновых лучей увеличивается их проникающая способность, т. е. чем меньше длина волны рентгеновского излучения, тем бóльшую толщину данного металла можно проконтролировать.

7) уменьшение интенсивности [1] рентгеновых лучей обратно пропорционально квадрату расстояния от анода до поверхности объекта просвечивания.

Интенсивность рентгеновых лучей зависит от толщины и плотности просвечиваемого металла и изменяется по следующему экспоненциальному закону:

$$I_1 = I_0 e^{-\mu\delta},$$

где I_0 — интенсивность пучка рентгеновых лучей, падающих на просвечиваемый объект (фиг. 64);

I_1 — интенсивность пучка рентгеновых лучей, прошедших через просвечиваемый объект;

[1] Интенсивностью лучей называется количество лучистой энергии, падающее за одну секунду на площадку в один квадратный сантиметр, поставленную перпендикулярно направлению потока лучей.

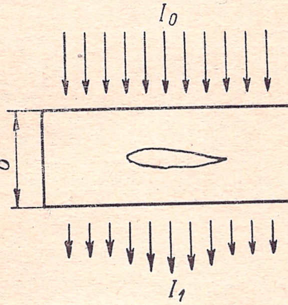
e — основание натуральных логарифмов;

μ — линейный коэффициент ослабления лучей, зависящий от плотности металла и от строения его атомов (определяемый порядковым номером в периодической системе элементов Менделеева);

δ — толщина просвечиваемого металла.

Таким образом, чем больше толщина данного просвечиваемого металла, тем меньше интенсивность рентгеновых лучей, прошедших через него, и чем больше атомный вес металла, тем сильнее уменьшается интенсивность рентгеновых лучей.

Рентгеновы лучи подразделяются на мягкие и жесткие. Чем короче длина волны, тем жестче рентгеновы лучи. Длина волны, в свою очередь, зависит от величины напряжения, приложенного к рентгеновской трубке: чем выше напряжение, тем короче длина волны.



Фиг. 64. Схема ослабления интенсивности рентгеновых лучей после прохождения через толщу металла.

Для контроля качества сварных швов и соединений применяют как мягкое изучение при напряжении 50—70 *кв* (для просвечивания стали малой толщины и легких сплавов), так и жесткие при напряжении 200—400 *кв* (для просвечивания стали большой толщины — до 100 *мм*).

В настоящее время начинают применять установки, называемые бетатронами, с помощью которых можно просвечивать металл толщиной свыше 500 *мм*. При этом получают очень жесткие рентгеновы лучи с длиной волны $\lambda = 10^{-11}$ *см* и менее.

Природа гамма-лучей, их свойства и источники излучения

Гамма-лучи являются разновидностью электромагнитных волн с длиной от 0,003 до 1,2 Å и по своим свойствам могут быть сопоставимы с рентгеновскими лучами. Длина волны зависит от энергии гамма-излучения данного радиоактивного вещества, измеряемой в *Мэв*.

Гамма-лучи возникают в результате самопроизвольного распада естественных радиоактивных химических элементов или искусственных радиоактивных изотопов [1]. Гамма-излучение не поддается регулированию извне и является постоянным на протяжении вполне определенного периода времени для каждого радиоактивного вещества. Время, в течение которого распадается половина

[1] Изотопы — химические элементы, занимающие одно и то же место в периодической системе элементов, но различающиеся по своему атомному весу.

первоначального количества атомов вещества, называется *периодом полураспада*. Период полураспада для различных радиоактивных веществ изменяется в очень широких пределах: у радия ($_{88}Ra^{226}$) он составляет 1590 лет, у тория ($_{90}To^{232}$) — $1,39 \cdot 10^{10}$ лет, у цезия ($_{55}Cs^{134}$) — 33 года, а у иридия ($_{77}Ir^{192}$) — всего 74 дня.

Ниже, в табл. 9. приведены периоды полураспада основных изотопов, применяемых в гаммаграфии.

Число атомов радиоактивных веществ с течением времени убывает по экспоненциальному закону, т. е.

$$N = N_0 e^{-\lambda t},$$

где N — число атомов в радиоактивном веществе в момент времени t;

N_0 — число атомов радиоактивного вещества при $t = 0$;

λ — постоянная распада данного радиоактивного вещества;

t — промежуток времени, за который определяется уменьшение числа атомов радиоактивного вещества.

Постоянная распада может быть определена из следующего отношения:

$$\lambda = \frac{0{,}693}{t},$$

где t — период полураспада в годах.

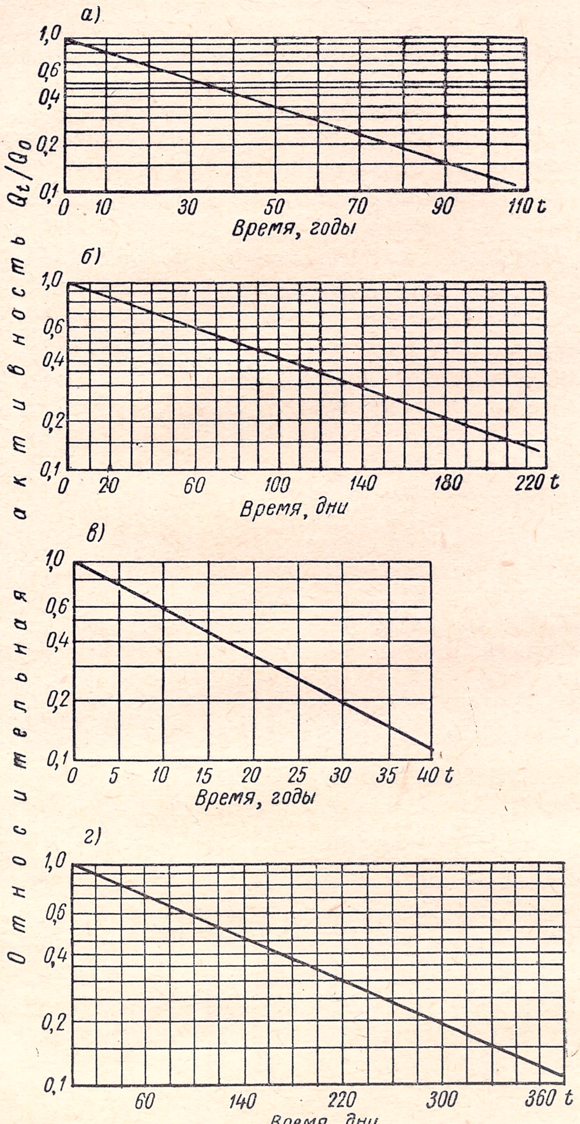
Зная постоянную распада λ, можно построить график уменьшения радиоактивного вещества с течением времени. Подобные графики приведены на фиг. 65.

Таким образом, с течением времени активность, или интенсивность, радиоактивных веществ падает, что должно учитываться для внесения поправок на ослабление активности с течением времени.

Для измерения активности радиоактивного вещества принята единица *кюри*, которой соответствует $3,7 \cdot 10^{10}$ распадов в сек., и части этой единицы: милликюри (*мкюри*), равная 0,001 *кюри* и микрокюри (*мккюри*), равная 0,000001 *кюри*. Для практического измерения активности излучения принята другая единица — грамм-эквивалент радия (*г-экв* Ra), представляющая такую активность любого радиоактивного вещества, которую дает 1 *г* Ra при тех же условиях измерения. Производной от грамм-эквивалента является миллиграм-эквивалент (*мг-экв* Ra).

Необходимо отметить, что слово грамм в обозначении активности в грамм-эквивалентах не имеет никакого отношения к весу или к геометрическим размерам препарата. Препараты разнообразных геометрических размеров и веса могут иметь одну и ту же активность излучения, так же как одна и та же активность в грамм-эквивалентах может быть у препаратов с разными геометрическими размерами и весом.

Активность радиоактивного изотопа зависит от мощности и продолжительности облучения в процессе преобразования хими-



Фиг. 65. Относительное изменение активности с течением времени: *а* — Cs^{137}; *б* — Ir^{192}; *в* — Eu^{152}; *г* — Tu^{170}.

ческого элемента в радиоактивный и многих других условий, геометрические же размеры препарата являются только одной из величин, которые определяют активность его излучения.

При переходе от активности в *кюри* к грамм-эквивалентам радия принимают: 1 *кюри* Co^{60} = 1,6 *г-экв* Ra; 1 *кюри* Ir^{192} = = 0,34 *г-экв* Ra; 1 *кюри* Tu^{170} = 0,014 *г-экв* Ra.

Единицей физической дозы рентгеновского и гамма-излучения является рентген (*р*). Это такая доза, при которой в результате полного ионизационного действия в воздухе при 0° С и давлении 760 *мм* рт. ст. образуется заряд в одну электростатическую единицу на 1 $см^3$ облучаемого объема.

Долями рентгена являются: миллирентген (*мр*), равный 10^{-3} *р*, и микрорентген (*мкр*), равный 10^{-6} *р*.

При физической дозе, равной 1 *р*, в 1 $см^3$ воздуха образуется $2{,}08 \cdot 10^9$ пар ионов.

Мощность физической дозы излучения измеряется в рентгенсекундах (*р/сек*), рентгенминутах (*р/мин*), рентгенчасах (*р/час*).

Мощностью физической дозы P называется доза D рентгеновского или гамма-излучения, поглощенная в единице объема за единицу времени t, т. е.

$$P = \frac{D}{t},$$

где P — мощность физической дозы;
D — физическая доза;
t — время облучения.

Так как по своей природе и физическим свойствам гамма-лучи близки к рентгеновым лучам и также представляют собой разновидность электромагнитных волн, то такие свойства рентгеновых лучей как способность вызывать фотохимические реакции, флуоресценцию, ионизировать газы, оказывать физиологическое действие, рассеиваться и терять свою интенсивность при прохождении через толщу металлов и др. в равной степени относятся и к гамма-лучам.

Существенное отличие гамма-лучей от рентгеновых заключается в следующем: если от одной и той же рентгеновской установки могут быть получены как жесткие, так и мягкие излучения, то при использовании радиоактивных веществ жесткость излучения данного радиоактивного вещества будет постоянной.

В практике гаммаграфирования находят применение радиоактивные вещества как с жесткими, так и с мягкими излучениями.

Рентгеновские аппараты и гамма-установки для контроля просвечиванием

Любой рентгеновский аппарат состоит из рентгеновской трубки, источника питания и пульта управления. Рентгеновская трубка является тем основным элементом рентгеновского аппарата, где

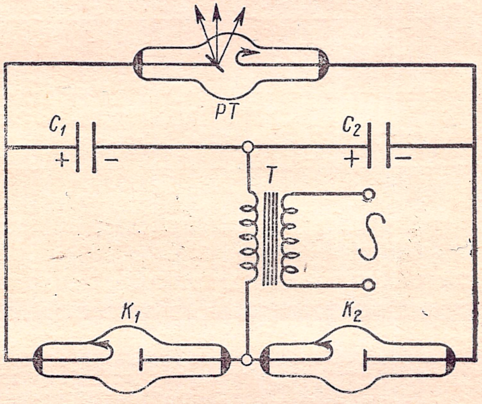
возникают рентгеновы лучи. Рентгеновские трубки разделяются на электронные и ионные. Для просвечивания металлов, в частности сварных соединений, применяются исключительно электронные рентгеновские трубки. В табл. 7 приведены некоторые типы рентгеновских трубок для просвечивания металлов.

Таблица 7

Некоторые типы рентгеновских трубок для просвечивания металлов

Марка трубки	Максимальная мощность трубки в *квт*	Максимальное анодное напряжение в *кв*	Охлаждение анода
3-БПМ-200	3	200	Масляное
1-ПВ-180	1	180	Водяное
1,5-БПМ1-200	1,5	200	Масляное
0,4-БПМ2-120	0,4	120	Масляное
0,7-БПМ-200	0,7	200	Масляное

Рентгеновские трубки для просвечивания металлов должны обеспечить возможность четкого изображения выявляемых пороков. Четкость и резкость изображения зависят от размеров фокусного пятна: чем меньше размеры последнего, тем резче изображение. Обычно размеры фокусного пятна делают не менее 25 *мм*^{2} во избежание расплавления анода даже при интенсивном его охлаждении.



Фиг. 66. Принципиальная схема рентгеновского аппарата с удваиванием напряжения: K_1, K_2 — кенотроны; T — трансформатор; C_1, C_2 — конденсаторы; PT — рентгеновская трубка.

В качестве источника питания рентгеновской трубки используется повышающий трансформатор, во вторичную цепь которого включаются кенотроны для выпрямления анодного тока и высоковольтные конденсаторы, позволяющие удвоить или утроить напряжение вторичной обмотки трансформатора. На фиг. 66 представлена принципиальная схема рентге-

новской установки с удвоенным напряжением на вторичной обмотке трансформатора. В данном случае конденсаторы C_1 и C_2 заряжаются через кенотроны K_1 и K_2, причем в течение одного полупериода разряжается один конденсатор, в течение другого полупериода — второй. Так как конденсаторы по отношению к рентгеновской трубке включены последовательно, то на зажимах трубки получается удвоенное напряжение.

Рентгеновские аппараты, работающие по принципу удваивания напряжения, получили наибольшее распространение.

В табл. 8 приведены некоторые наиболее распространенные рентгеновские аппараты, применяемые для контроля просвечиванием.

Таблица 8

Наиболее распространенные рентгеновские аппараты для контроля просвечиванием

Марка аппарата	Тип аппарата	Максимальное напряжение в *кв*	Контролируемая толщина металла в *мм*
РУП-60-20	Кабельный	60	Алюминий до 30 Сталь до 3
РУП-200-20-М5	Кабельный	200	Алюминий до 200 Сталь до 50
РУП-400-5	Блок-трансформатор	400	Сталь до 100
РУП-120-5	Блок-трансформатор	120	Алюминий до 100 Сталь до 25
РУП-200-5	Блок-трансформатор	200	Алюминий до 200 Сталь до 60

На пульте управления любого рентгеновского аппарата сосредоточены устройства для включения и выключения аппарата, для установления и поддержания заданного режима просвечивания и другие вспомогательные элементы управления аппаратом.

Как уже отмечалось, в практике просвечивания металлов больших толщин используются бетатроны с энергией излучения 2,5; 4,5; 10; 20 *Мэв*, что позволяет просвечивать толщины до 500 *мм*.

Разрешающая способность бетатронов очень высока. Так, бетатрон на 10 *Мэв* с выходом излучения 50 *р* в мин. на расстоянии 1 *м* от источника излучения дает возможность просвечивать сталь толщиной 230 *мм* на расстоянии 1800 *мм* от фокуса лучей за 1 мин. Для просвечивания стали толщиной 25 *мм* требуется всего 1 сек. Чувствительность достигает 1%.

Бетатрон на 20 *Мэв* с выходом излучения 100 *р* в мин. на расстоянии 1 *м* от источника излучения дает возможность проконтролировать 60 плит в час толщиной 254 *мм*.

Имеются бетатроны с энергией излучения 100 *Мэв*; по интенсивности излучения такая установка эквивалентна 35 *кГ* радия.

Контроль просвечиванием гамма-лучами с каждым годом занимает все более важное место среди других методов контроля сварных швов и соединений, а с появлением искусственных радиоактивных изотопов с мягким и средним излучением значительно расширилась область применения промышленного гаммаграфирования.

В настоящее время в качестве источников гамма-излучения, как правило, используются искусственные радиоактивные изотопы; так как их стоимость гораздо ниже стоимости естественных радиоактивных элементов, они могут быть получены в больших количествах и с различной энергией излучения, что дает возможность просвечивать большие толщины стали — от 50 до 250 *мм* (жесткими гамма-лучами с энергией от 1 *Мэв* и более), средние толщины стали от 30 до 75 *мм* (гамма-лучами средней жесткости с энергией порядка 0,4—0,6 *Мэв*), малые толщины стали — до 10 *мм* и легкие сплавы (гамма-лучами мягкого излучения с энергией менее 0,3 *Мэв*.

При выборе изотопа для использования в промышленной дефектоскопии необходимо прежде всего учитывать для контроля каких металлов и сплавов, каких толщин и выявления каких пороков в основном он будет применен. С увеличением удельного веса контролируемого металла и его толщины предпочтительнее изотоп с большей энергией излучения — с более жесткими лучами. Наоборот, при контроле металла малых толщин или металла с малым удельным весом лучше использовать изотоп, обладающий мягким излучением.

С другой стороны, чем мягче гамма-излучение, тем более мелкие пороки могут быть выявлены и тем более контрастно они будут выступать на снимке. Следует помнить, что гамма-лучами могут быть выявлены лишь пороки, лежащие в пределах чувствительности метода.

Кроме того, изотоп должен:

1) обеспечивать необходимую интенсивность излучения при малых геометрических размерах;

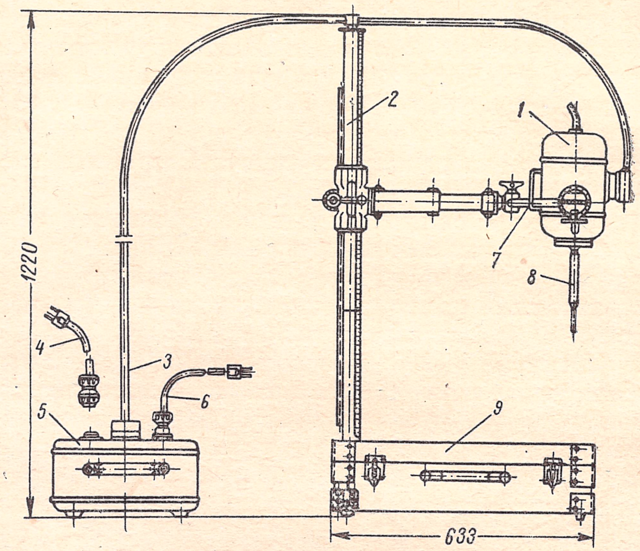
2) иметь достаточно длительный период полураспада;

3) иметь относительно небольшую стоимость и быть удобным в эксплуатации.

Изотопы с малой жесткостью излучения, большим периодом полураспада и высокой удельной активностью считаются наиболее выгодными.

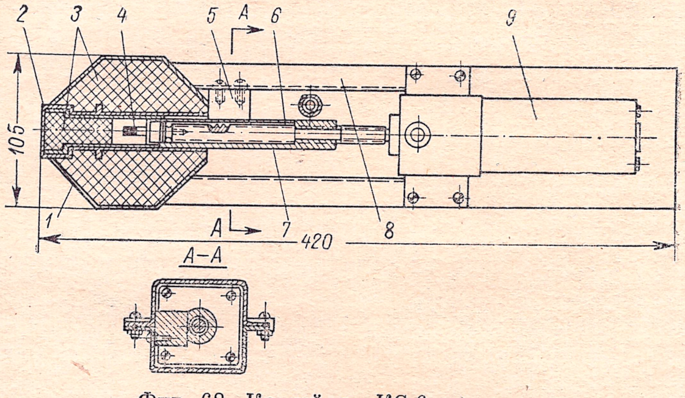
Препараты радиоактивных изотопов представляют собой порошкообразный продукт или кристаллическое вещество, помещаемые в специальные ампулы, или же твердое тело (например, Co^{60} — кусок металла).

Препараты изготавливают на различную активность, которая, например, для Co^{60} составляет от 0,5 до 100 *г-экв* Ra, для Cs^{137} —



Фиг. 67. Гамма-установка ГУП-Tu-0,5-1:

1 — контейнер-манипулятор; 2 — штатив; 3 — соединительный кабель; 4 — сетевой кабель для присоединения; 5 — пульт управления; 6 — кабель сетевой для переменного тока; 7 — съемные направляющие; 8 — съемный центратор; 9 — чемодан.

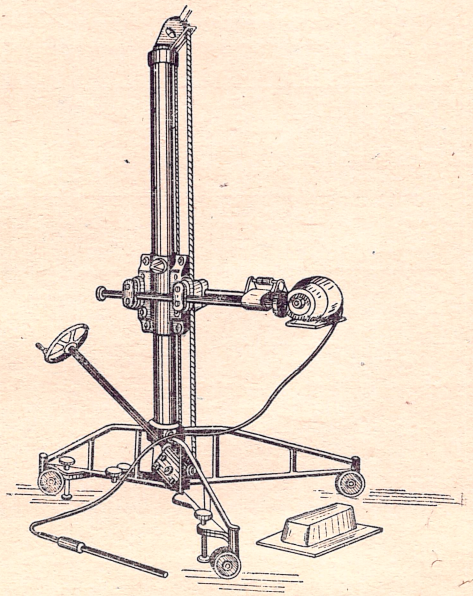


Фиг. 68. Контейнер КС-6 в разрезе:

1 — кожух контейнера; 2 — пробка; 3 — свинцовая заливка; 4 — источник излучения; 5 — направляющий кулачок; 6 — ходовой винт; 7 — ходовая гайка; 8 — кожух; 9 — двигатель типа МУ-50.

от 0,1 до 2 *г-экв* Ra; для Ir^{192} — от 0,01 до 20 *г-экв* Ra; для Tu^{170} — от 0,002 до 0,5 *г-экв* Ra. Для хранения препаратов применяют специальные защитные контейнеры, размеры и вес которых увеличивают по мере увеличения активности препарата. Контейнеры выполняются из свинца, залитого в стальной или чугунный наружный корпус. В центре свинцовой заливки имеется гнездо, куда помещают препарат радиоактивного изотопа.

В соответствии с большим разнообразием активности радиоактивных изотопов и в зависимости от их назначения существуют различные конструкции установок, контейнеров и приспособлений, позволяющих работать с применением того или иного препарата.



Фиг. 69. Общий вид гамма-установки типа ГУП-Co-0,5-1.

На фиг. 67 представлена гамма-установка ГУП-Tu-0,5-1, используемая для гаммаграфирования:

а) одиночных деталей направленным пучком гамма-лучей с углом конуса 40°;

б) нескольких деталей одновременно при круговом их расположении;

в) цилиндрических деталей с диаметром от 400 до 2000 *мм* за одну экспозицию с расположением источника излучения в центре изделия.

Установка используется как в стационарных, так и в полевых условиях.

Контейнер КС-6, представленный на фиг. 68, используется для источников излучения Co^{60} активностью до 0,25 *г-экв* Ra и Ir — до 2—3 *г-экв* Ra; его вес 13 *кГ*. Контейнер имеет электрическую систему дистанционного управления, снабженную сигнальными лампочками, указывающими положение радиоактивного препарата. Радиоактивный препарат *4* выдвигается вместе с пробкой *2* при вращении винта *6*, приводимого в движение мотором типа МУ-50.

Общий вид установки ГУП-Co-0,5-1 представлен на фиг. 69; ее габаритные размеры: высота 2,3 *м*, площадь — 1,38 × 1,3 *м*, общий вес 165 *кГ*.

Установка ГУП-Co-5-1 предназначена для препарата Co^{60} активностью 5 *г-экв* Ra, весит 550 *кГ*, занимает площадь 1 × 1,5 *м* и имеет высоту 2,2 *м*. Вес установки ГУП-Co-50-1 составляет 700 *кГ*, при одинаковых с ГУП-Co-5-1 габаритных размерах.

В данном случае общий вес установок возрастает за счет увеличения размеров защитных контейнеров.

Из всех радиоактивных изотопов, приведенных в табл. 9, наименьшей энергией излучения обладает Tu^{170}, в связи с чем защитный контейнер для этого препарата весит всего 100—200 *Г*.

Таблица 9

Основные свойства некоторых радиоактивных изотопов, применяемых для гаммаграфирования сварных соединений

Наименование изотопа	Энергия излучения в *Мэв*	Период полураспада	Активность 1 *мкюри* в *мг-экв*	Материал и толщина сварного соединения
Co^{60}	2,13; 1,33; 1,17	5,24 года	1,57	Сталь и другие тяжелые металлы от 60 до 200 *мм*
Se^{75}	От 0,066 до 0,405	125 дней	0,19	Сталь от 7 до 15 *мм*
Cs^{134}	От 0,563 до 1,367	2,07 года	1,06	Сталь от 15 до 65 *мм*
Cs^{137}	0,661	30 лет	0,42	Сталь от 20 до 80 *мм*, титановые сплавы от 25 до 100 *мм* и алюминий от 70 до 300 *мм*
Eu^{152}	От 0,122 до 1,405	12,7 лет	0,76	Сталь от 10 до 60 *мм*, титановые сплавы 15—90 *мм* и алюминиевые сплавы —50—250 *мм*
Eu^{154}	От 0,336 до 1,116	16 лет	0,76	
Tu^{170}	0,084	129 дней	$1,4\times10^{-4}$	Сталь от 1 до 10 *мм*, титан до 20 *мм*, алюминиевые сплавы до 50 *мм*, и магний от 30 до 150 *мм*
Jr^{192}	От 0,122 до 1,405	74 дня	0,65	Сталь от 10 до 40 *мм*, титановые сплавы от 15 до 70 *мм* и алюминий от 50 до 250 *мм*

Для удобства и безопасности работы с препаратами радиоактивных изотопов применяются различные приспособления: механические или электромеханические захваты, пинцеты, щипцы и т. п. Заслуживают внимания контейнеры-манипуляторы с механизмом управления ампулой с радиоактивным препаратом. По-

средством этого механизма с дистанционным управлением автоматически открывается и закрывается затвор контейнера, выдвигается и ставится в рабочее положение ампула и убирается обратно в положение «хранения».

Основные факторы, определяющие чувствительность метода рентгено- и гаммаграфирования

Чувствительность метода является основной характеристикой, показывающей его пригодность для контроля качества сварных соединений и конструкций. Чувствительность оценивается наименьшей величиной выявляемого порока в направлении просвечивания, выраженной в процентах от общей толщины просвечиваемого металла (относительная чувствительность) или в миллиметрах (абсолютная чувствительность).

К числу основных фактов, определяющих чувствительность метода рентгено- и гаммаграфирования, относятся:

1) энергия излучения, характеризующая жесткость лучей;

2) коэффициент линейного поглощения, характеризующий плотность или удельный вес контролируемого металла;

3) толщина контролируемого металла.

При прочих равных условиях с увеличением энергии излучения чувствительность метода понижается, т. е. чем выше энергия излучения, тем более крупные пороки могут быть выявлены при рентгено- и гаммаграфировании. Подсчеты показывают, что при контроле стали и использовании источника с энергией излучения 0,5 *Мэв* может быть выявлен минимальный порок (в направлении просвечивания), равный 0,42 *мм*; с увеличением энергии излучения источника до 1,5 *Мэв* выявляется минимальный порок, равный 0,68 *мм*; при увеличении энергии излучения до 3 *Мэв* может быть выявлен порок не менее 1,1 *мм*. Таким образом, с увеличением энергии излучения источника уменьшается возможность выявления минимального порока.

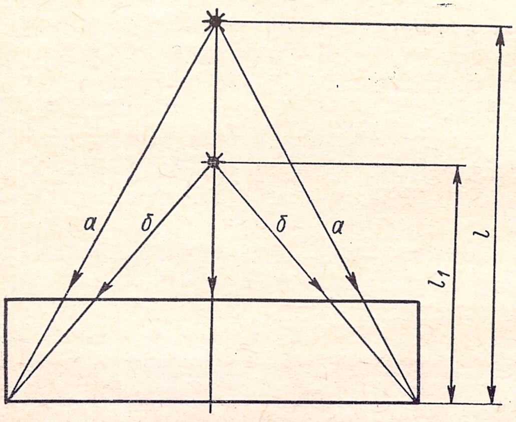
С увеличением плотности просвечиваемого металла чувствительность метода повышается. При просвечивании плотных металлов (стали, никеля и др.) становится заметной разница интенсивности лучей, прошедших через сплошной металл и металл, имеющий несплошности, а следовательно, потемнение пленки в местах залегания пороков будет более заметно, что позволяет обнаруживать пороки малых размеров. При просвечивании легких металлов и их сплавов эта разница интенсивности лучей заметна только при значительных размерах порока.

С изменением толщины просвечиваемого металла чувствительность метода понижается:

1) по мере уменьшения толщины при жестком гамма-излучении и при просвечивании рентгеновыми лучами;

2) с увеличением толщины просвечиваемого металла.

Кроме основных факторов чувствительности метода, большое значение имеют факторы, определяющие контрастность и четкость снимков. К числу таких факторов относятся: размеры источника излучения, качество рентгеновской пленки, размер пленки (длина просвечиваемого участка), время экспозиции, фокусное расстояние (расстояние центрального луча источника излучения до пленки), плотность прилегания кассеты с пленкой к поверхности просвечиваемого шва, характер и расположение порока в сварном соединении, применение усиливающих флуоресцирующих экранов, применение свинцовой фольги, техника проявления пленки и др.



Фиг. 70. Схема прохождения рентгеновых и гамма-лучей при различных фокусных расстояниях.

При рентгено- и гаммаграфировании необходимо учитывать следующее.

1. С увеличением размеров фокусного пятна рентгеновской трубки и геометрических размеров радиоактивного препарата четкость и резкость изображения, фотографируемого на пленку, ухудшается, а следовательно, качество снимка понижается.

2. С увеличением фокусного расстояния четкость изображения на пленке повышается, а следовательно, повышается и качество снимка. Однако вместе с увеличением фокусного расстояния возрастает время экспозиции, потому что интенсивность рентгеновых и гамма-лучей уменьшается обратно пропорционально квадрату расстояния от источника лучей до поверхности рентгеновской пленки. С уменьшением фокусного расстояния четкость изображения понижается. Последнее ясно из схемы фиг. 70, откуда видно, что крайние лучи *а* проникают через меньшую толщину при фокусном расстоянии l по сравнению с крайними лучами *б* при фокусном расстоянии l_1. Вследствие этого интенсивность лучей, попадающих на пленку, будет разная: в центре почернение снимка будет больше, нежели по краям, а следовательно, и чувствительность к выявлению пороков по мере удаления от центра пленки понижается. Практически для повышения качества снимков рекомендуется применять большие фокусные расстояния. Наиболее оптимальными фокусными расстояниями являются $l = 500—600$ *мм*.

3. Плотное прилегание кассеты с пленкой к поверхности просвечиваемого изделия способствует повышению чувствительности снимка.

4. Время экспозиции зависит от толщины просвечиваемого металла, фокусного расстояния, интенсивности излучения, чувствительности рентгеновской пленки и схемы зарядки кассет. Обычно время экспозиции в первом приближении определяется по графикам, а затем уточняется экспериментально.

Для сокращения времени экспозиции пользуются усиливающими флуоресцирующими экранами или свинцовыми экранами из фольги. При этом практика показывает, что применение флуоресцирующих экранов, сокращая время экспозиции, одновременно понижает чувствительность вследствие меньшей четкости и контрастности снимков по сравнению со снимками, полученными без усиливающих экранов или со свинцовыми экранами в виде фольги различной толщины. Поэтому усиливающие экраны следует применять лишь тогда, когда это крайне необходимо ввиду слишком большого времени экспозиции и когда их применение не влияет на выявление недопустимых пороков.

По данным [27], применением усиливающих экранов при гаммаграфировании стали толщиной 5 *мм* достигается весьма значительное сокращение времени экспозиции, а именно: при использовании Co^{60} — в 7,4 раза, Cs^{137} — в 20 раз, Ir^{192} — в 64 раза.

При просвечивании стали толщиной 50 *мм* время экспозиции уменьшается следующим образом: при применении Co^{60} — в 12 раз, Cs^{137} — в 28 раз, Ir^{192} — в 51 раз.

5. Применяемые листы свинцовой фольги (без усиливающих экранов) выполняют роль фильтров, поглощающих рассеянное и вторичное излучение, а также в определенных пределах толщин (для стали от 5 до 30 *мм*) служат усиливающими экранами. Для поглощения рассеянного и вторичного излучения во всех случаях рекомендуется по ходу лучей за кассетой размещать свинцовый лист толщиной до 10 *мм*. При этом четкость снимков повышается. С увеличением толщины просвечиваемой стали и толщины фольги усиливающее действие последней падает, а время экспозиции возрастает.

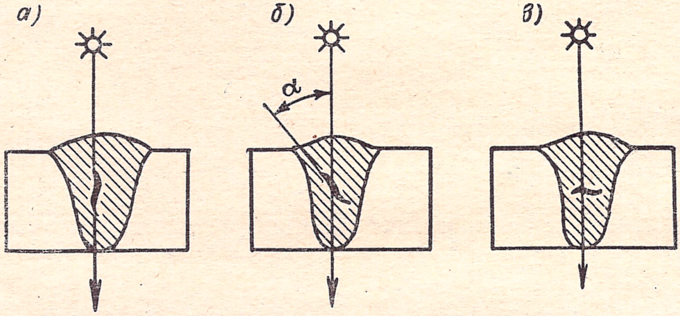
Однако с увеличением толщины просвечиваемой стали фольга выполняет роль фильтров рассеянного излучения, что повышает чувствительность метода. Это становится особенно заментым с увеличением толщины фольги до 1,5 *мм* при просвечивании стали толщиной 50 *мм*. В этом случае чувствительность повышается до 20—30% по сравнению с просвечиванием без применения фольги.

Поэтому, несмотря на увеличение времени экспозиции, рекомендуется для повышения чувствительности с целью выявления минимальных пороков (в особенности трещин) применять свинцовую фольгу. При этом для Ir^{192} рекомендуется повышать толщину фольги до 1,5 *мм* при контроле стали толщиной от 50 *мм* и выше, а для Cs^{137} — при толщине стали от 30 *мм* и выше.

Для более плотного прилегания фольги к пленке следует набирать указанную толщину фольги из нескольких слоев толщиной 0,4—0,5 *мм*.

6. С увеличением длины участка шва, просвечиваемого за один прием, а следовательно, с увеличением длины рентгеновской пленки, при прочих равных условиях чувствительность метода понижается вследствие уменьшения четкости и резкости изображения на концевых участках пленки. С целью повышения чувствительности рекомендуется при уменьшении фокусного расстояния уменьшать и длину просвечиваемого участка так, чтобы она составляла не более 0,75 фокусного расстояния.

7. С изменением расположения порока в сварном соединении и его характера меняется чувствительность снимка. Так, например,



Фиг. 71. Различное расположение трещин в сварном шве и их выявляемость: *а* — направление трещин совпадает с направлением потока лучей (наилучшая выявляемость); *б* — трещина расположена под углом α к направлению потока лучей (чем больше α, тем труднее выявляется трещина); *в* — трещина расположена перпендикулярно направлению потока лучей (возможность выявления зависит от ширины трещины — чем она шире, тем лучше выявляемость).

трещина, направление которой совпадает с направлением потока рентгеновых или гамма-лучей, четко фиксируется на пленке (фиг. 71, *а*). Трещина же, расположенная под углом α к направлению центрального потока лучей, выявляется хуже по мере увеличения угла α, и в конечном итоге обнаружение порока становится невозможным вследствие того, что разница плотности потемнения пленки в дефектном месте по сравнению с плотностью потемнения бездефектного сварного соединения становится неразличимой (фиг. 71, *б*, *в*).

Четкость изображения порока на пленке (при прочих равных условиях) зависит от формы порока. Так, например, более четко выявляются пороки, имеющие прямолинейные грани, направленные параллельно направлению пучка лучей по сравнению с пороками цилиндрической, шаровой и других форм.

С увеличением толщины просвечиваемого металла наблюдается искажение размеров пороков, фиксируемых на пленку. Это иска-

жение зависит от расположения пороков относительно источника излучения, а именно: если порок располагается на стороне, обращенной к источнику излучения, то его проекция будет фиксироваться на пленку в увеличенном масштабе.

8. Результаты просвечивания зависят от качества применяемой рентгеновской пленки, т. е. от ее светочувствительности, контрастности, максимальной оптической плотности, размеров зерна фотоэмульсии, оптической плотности вуали и т. д.

9. Качество снимка, а следовательно, результаты контроля, в значительной степени зависят от техники последующей обработки пленки — ее проявления, фиксирования, промывки, сушки и т. д.

Проявление пленки должно производиться в соответствии с указаниями завода-поставщика пленки. При этом особо важное значение имеет длительность проявления и температура проявителя. Во всех случаях снимки должны быть свободны от недостатков, затрудняющих правильность расшифровки.

Необходимо учитывать влияние перечисленных факторов. В табл. 10 приведены данные чувствительности методов в зависимости от толщины контролируемого металла.

Таблица 10

Чувствительность рентгено- и гаммаграфирования при различных толщинах металла (по ГОСТ 7512—55)

Толщина металла в *мм*	Чувствительность в %			
	Сталь всех марок, медь, латунь и др.		Алюминий и сплавы алюминия, магния, кремния	
	при рентгенографировании	при гаммаграфировании излучением Co^{60}	при рентгенографировании	при граммаграфировании излучением Co^{60}
5	3,5	6,0	6,0	12,0
10	2,5	4,0	4,0	8,0
20	1,5	3,0	3,0	6,0
50	2,0	2,5	2,5	3,5
100	2,5	3,0	3,0	4,0
150	—	4,0	—	—

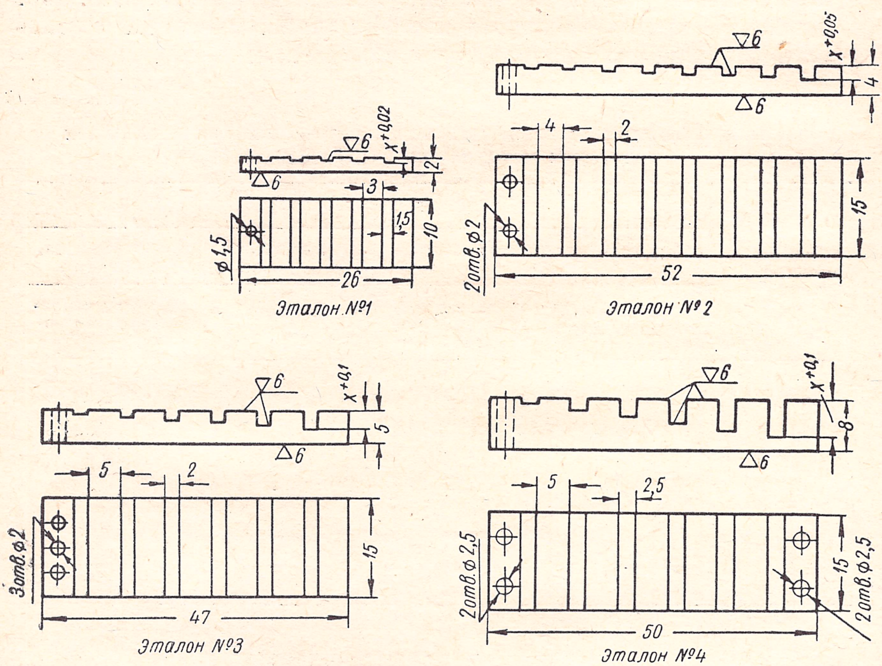
Эталоны чувствительности

Для определения чувствительности, достигаемой при рентгено- и гаммаграфировании сварных соединений, необходимо (согласно ГОСТ 7512 — 55) применять эталоны чувствительности. Последние изготовляют из того же металла, что и контролируемый объект; эталоны представляют собой пластинки шириной 10—15 *мм* с выфрезерованными в них прямоугольными канавками различной глубины и просверленными сквозными отверстиями.

Таблица 11

Размеры элементов эталонов в *мм*

№ эталонов	Пластинка			Канавка	
	длина	ширина	толщина	ширина	глубина
1	26	10	2	1,5	0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5
2	52	15	4	2	0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,5; 1,8
3	47	15	5	2	0,5; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0;
4	50	15	8	2,5	1; 2; 3; 4; 5; 6;



Фиг. 72. Пластинчатые эталоны чувствительности.

В соответствии с ГОСТ 7512—55 изготовляют четыре типа эталонов, отличающихся друг от друга длиной и толщиной пластин, глубиной и шириной канавок. Рекомендуемые размеры эталонов приведены в табл. 11.

На фиг. 72 представлены типы пластинчатых эталонов чувствительности.

Эталоны устанавливают вдоль сварного шва на поверхности просвечиваемого объекта, обращенной к источнику излучения, посередине просвечиваемого участка на каждом снимке.

Иногда эталоны чувствительности устанавливают на изделие со стороны кассеты (при просвечивании труб и других изделий через две стенки). В этих случаях показатели чувствительности получаются более высокими (по сравнению с установкой эталонов со стороны источника излучения), а поэтому в журнале контроля сварных швов просвечиванием делается отметка о месте установки эталона.

Чувствительность вычисляется по следующей формуле:

$$K = \frac{X \cdot 100}{T + t} \%,$$

где X — наименьшая глубина канавки эталона, выявленная на снимке;

T — толщина металла в месте установки эталона;

t — полная толщина пластинки эталона.

Материалы, применяемые при контроле рентгеновыми и гамма-лучами

Рентгеновская пленка является основным фотоматериалом для контроля, и от ее качества во многом зависят конечные результаты контроля.

Отечественной промышленностью выпускаются различные типы рентгеновских пленок, как-то: «Рентген X» для использования с усиливающими экранами, «Рентген XX», РТ-1 и РТ-2 для съемок без применения усиливающих экранов.

В табл. 12 приведены основные данные, характеризующие указанные пленки.

Таблица 12

Основные характеристики рентгеновских пленок

Данные рентгеновских пленок	«Рентген X»	«Рентген XX»	РТ-1	РТ-2
Светочувствительность в обратных рентгенах:				
по плотности 0,85 над вуалью	150	—	90	350
по градиенту, равному 1 . . .	—	Не ниже 25	—	35
Коэффициент контрастности . .	Не ниже 2,7	Не ниже 2,7	3,5	>3,5

Примечание: В зависимости от срока и условий хранения чувствительность пленок может сильно изменяться по сравнению с приведенными данными.

Светочувствительность пленок оценивается числом обратных рентген $\left(\frac{1}{p}\right)$. Большее число является показателем большей чувствительности пленки к рентгеновым лучам, что требует при прочих равных условиях меньшего времени экспозиции, т. е. время экспозиции обратно пропорционально светочувствительности пленки. Пленка должна храниться в сухом, отапливаемом и вентилируемом помещении без резких изменений температуры и влажности (следует поддерживать температуру $17 \pm 3^\circ$ С при относительной влажности воздуха 60—70%). Коробки с рентгеновской пленкой необходимо хранить в вертикальном положении на специальных стеллажах, расположенных на расстоянии не менее 1 *м* от отопительных приборов и не менее 0,5 *м* от пола помещения. Нельзя допускать попадания прямых солнечных лучей на коробки с пленкой, а также вредных для пленки газов: аммиака, окиси углерода, сероводорода и др. Не допускается совместное хранение пленки с радиоактивными веществами, бензином, керосином и кислотами.

Усиливающие флуоресцирующие экраны чаще всего изготовляют из вольфрамата кальция ($CaWO_4$), издающего белый свет, к которому наиболее чувствительна эмульсия пленок. Рекомендуется применять экраны с плотностью флуоресцирующего слоя в зависимости от жесткости излучения, в частности при жестком и среднем излучениях применяют экраны с плотностью 120 *мг/см*^{2}, а при мягком излучении — 60 *мг/см*^{2}. Иногда применяют комбинированные экраны: передний (по направлению хода лучей) с меньшей плотностью флуоресцирующего слоя и задний — с большей плотностью. Однако чаще в практике применяют передние и задние экраны с одинаковой плотностью в пределах 60 *мг/см*^{2}, что несомненно проще и удобнее.

Свинцовая фольга, применяемая при рентгено- и гаммапросвечивании, должна иметь чистую, гладкую поверхность, без царапин, вмятин и складок. Фольгу изготовляют различной толщины в соответствии с ГОСТ 1327—47. Толщина фольги выбирается в зависимости от энергии источника излучения: чем она выше, тем толще берется фольга.

Проявитель и закрепитель (фиксаж) применяют для обработки рентгеновской пленки. Наиболее распространенным проявителем является метолгидрохиноновый. Состав стандартного проявителя:

Метол (ГОСТ 24—60)	2 *г*
Сульфат натрия (кристаллический), по ГОСТ 903—41	180 *г*
Гидрохинон (ГОСТ 2549—60)	8 *г*
Сода кристаллическая (ГОСТ 84—41)	118 *г*
Бромистый калий (ГОСТ 4160—48)	5 *г*
Вода дистиллированная	до 1000 *см*^{3}

Рецептурные составы других метолгидрохиноновых проявителей незначительно отличаются от вышеприведенного стандартного состава.

Для приготовления проявителя берут 500 *см*³ дистиллированной воды с температурой 50° С и растворяют сначала метол, затем сульфат натрия, гидрохинон и т. д. При этом каждое последующее вещество вводится в раствор после полного растворения предыдущего. После растворения всех веществ, указанных в рецепте проявителя, добавляют остальные 500 *см*³ воды.

Продолжительность проявления зависит от температуры проявителя: чем она выше, тем меньше время проявления. Однако не следует стремиться к быстрому проявлению, так как с повышением температуры появляется опасность растворения фотоэмульсии пленки, а кроме того, ухудшается качество изображения дефектов сварного соединения, что затрудняет расшифровку снимка.

При температуре 16—17° С продолжительность проявления в свежем проявителе пленки «Рентген X» составляет 6,5—9 мин., а пленки «Рентген XX» — 8—10 мин.

В одном литре проявителя можно проявить 1000 *см*² пленки.

В качестве закрепителя применяют гипосульфит, растворяемый в воде в следующем соотношении:

Гипосульфит (тиосульфит натрия), по ГОСТ 244—41	250 *г*
Вода .	1000 *см*³

При температуре закрепителя 20° С время фиксирования составляет в среднем 10—12 мин.

Чаще всего применяется так называемый кислый фиксаж следующего состава:

Гипосульфит (тиосульфит натрия) (кристаллический) .	250 *г*
Сульфат натрия (кристаллический)	55 *г*
Серная кислота (уд. вес 1,84)	3,5 *см*³
Вода .	до 1000 *см*³

Время фиксирования в кислом фиксаже составляет в среднем 15—20 мин. при температуре 20° С. Кислый фиксаж указанного состава сохраняется дольше обыкновенного и дает лучшие результаты фиксирования.

Устройство кассет для пленок и их зарядка

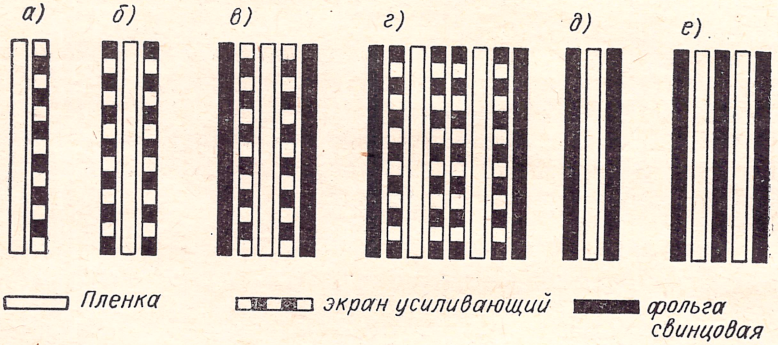
Кассеты, предназначенные для зарядки пленки, усиливающих экранов и свинцовой фольги, разделяются на мягкие и жесткие. Чаще всего пользуются мягкими кассетами, которые изготовляют из светонепроницаемых эластичных материалов: из черной бумаги в виде двух пакетов (наружного и внутреннего), дерматина, резины и т. п.

Жесткие кассеты изготовляют из листового алюминия, дерева и др.

Размеры кассет определяются размерами просвечиваемых участков сварных швов, а также условиями просвечивания и фотообработки пленки. Длина снимка должна быть не более 0,75 фокусного расстояния; этим размером и определяется длина кассеты. Ширина снимка зависит от ширины сварного шва плюс по 20 *мм* на каждый край шва; этими размерами определяется ширина кассеты.

Зарядка кассет производится в комнате с красным светом.

При просвечивании с усиливающими экранами рентгеновская пленка укладывается между двумя экранами флуоресцирующими



Фиг. 73. Схемы вариантов зарядки кассет: *а* — пленка с одним задним усиливающим экраном; *б* — пленка с двумя усиливающими экранами; *в* — пленка с двумя усиливающими экранами и двумя листами свинцовой фольги; *г* — две пленки с усиливающими экранами и листами свинцовой фольги (применяются при просвечивании жесткими лучами для получения двух снимков); *д* — пленка с двумя листами свинцовой фольги, служащими фильтрами для поглощения рассеянного излучения и усиления; *е* — две пленки, каждая между листами свинцовой фольги.

поверхностями к пленке, после чего все помещают в пакет из черной бумаги, вставляемой внутрь кассеты.

При просвечивании мягкими рентгеновыми лучами (напряжение на трубке около 20 *кв*) лучше применять один задний усиливающий экран.

В случае просвечивания без усиливающих экранов пленка закладывается между двумя листами свинцовой фольги, а собранный таким образом пакет укладывается между двумя картонными полосами шириной, равной ширине пленки, а затем вкладывается в пакет из черной бумаги, который, в свою очередь, вставляется в кассету.

При просвечивании с применением усиливающих экранов и энергии излучения 250 *кэв* и более рекомендуется применение свинцовой фольги, выполняющей роль фильтров, поглощающих рассеянное излучение и тем самым обеспечивающих получение более четких снимков.

На фиг. 73 представлена схема вариантов зарядки кассет.

Во время зарядки и разрядки кассет необходимо осторожно обращаться с пленкой. Нельзя брать пленку влажными руками, держать ее в плотно сжатых пальцах продолжительное время. Нельзя класть пленку на стол, не подложив под нее чистую бумагу. Не следует перезаряжать кассету руками со следами проявителя или фиксажа.

Во всех случаях зарядки кассет необходимо, чтобы усиливающие экраны плотно прилегали к пленке, а листы фольги — к усиливающим экранам и т. д.

При просвечивании легких сплавов фольга в кассету чаще всего не закладывается, так как в противном случае увеличивается время экспозиции и резко понижается контрастность и четкость снимка.

При зарядке и разрядке кассет нельзя допускать повреждения или загрязнения усиливающих экранов.

Техника просвечивания сварных швов и соединений рентгеновыми и гамма-лучами

Просвечивание рентгеновыми и гамма-лучами с фиксированием результатов на пленку является основным и наиболее распространенным методом контроля сварных швов и соединений без разрушения. Этот метод включает следующие основные операции: подготовку сварного изделия к просвечиванию, определение условий и режима просвечивания, просвечивание, фотообработку и сушку пленки, расшифровку рентгенограмм и оценку качества.

Просвечивание производится после внешнего осмотра сварных швов и устранения видимых наружных пороков.

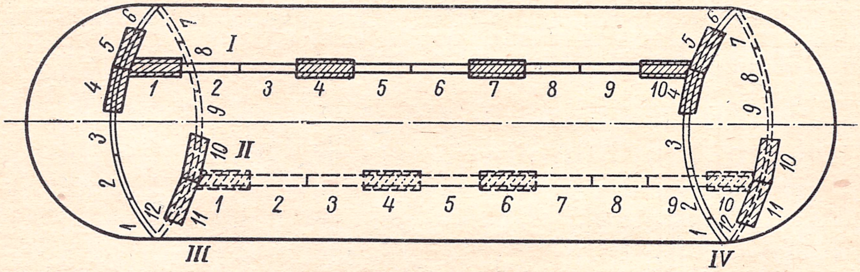
В ряде случаев просвечиванию предшествуют другие предварительные методы контроля: методы цветной, люминесцентной, ультразвуковой дефектоскопии. Особенно часто используется как предварительный ультразвуковой метод, позволяющий получить достаточно быстро общее представление о качестве сварных швов путем прозвучивания.

Как правило, просвечивание сварных швов носит выборочный характер, и только в особых случаях просвечиванию подвергаются 100% стыковых швов. Обычно длина швов, подлежащих просвечиванию, определяется ТУ или правилами изготовления и безопасной эксплуатации определенного типа конструкций (судов, котлов и сосудов, работающих под давлением, газопроводов, трубопроводов и т. п.).

Места просвечивания устанавливает ОТК завода-изготовителя на основе внешнего осмотра и ультразвуковой дефектоскопии, если последняя применяется в качестве предварительного контроля. После этого все стыковые сварные швы нумеруют и размечают на участки с учетом длины рентгено- и гамма-снимков и согласно схеме просвечивания, выдаваемой ОТК завода.

На фиг. 74 представлена принципиальная схема просвечивания барабана парового котла с указанием участков, подлежащих просвечиванию. В соответствии со схемой просвечивания устанавливают заряженные кассеты, закрепляемые на изделии при помощи специальных приспособлений, обеспечивающих плотное и равномерное прилегание их к просвечиваемым участкам шва. К изделию с помощью пластилина прикрепляют свинцовые маркировочные знаки (определяющие номер шва, номер участка и т.п.). Посередине каждого просвечиваемого участка вдоль кромки шва устанавливают эталоны чувствительности.

При использовании препаратов большой активности рекомендуется применять дополнительные свинцовые кассеты (с толщи-



Фиг. 74. Принципиальная схема просвечивания барабана парового котла (римскими цифрами обозначены швы, арабскими цифрами — участки швов; заштрихованы участки, намеченные к просвечиванию).

ной стенок 3—10 *мм*), в которые вкладываются основные кассеты, заряженные так, как указано выше. Дополнительные кассеты предназначены для того, чтобы предохранить пленку от сильного рассеянного излучения и тем самым повысить качество снимка. Чаще всего вместо дополнительных кассет применяют свинцовые пластины соответствующей толщины, которые и устанавливают с передней и задней стороны кассеты.

В зависимости от толщины и удельной плотности просвечиваемого металла применяют те или иные условия и режимы просвечивания.

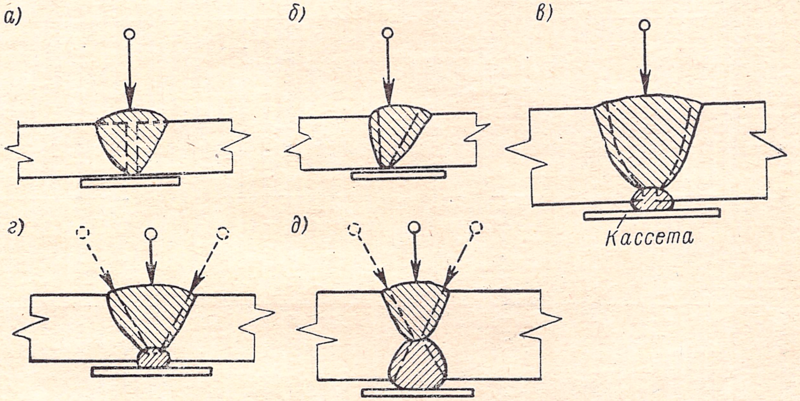
В табл. 13 приведены рекомендуемые условия просвечивания стальных изделий с толщиной стенок до 100 *мм*.

Техника просвечивания сварных швов и соединений зависит не только от удельной плотности и толщины просвечиваемого металла, но и от типа сварного соединения, который определяет место установки кассеты с пленкой по отношению к источнику излучения с целью наилучшего выявления возможных пороков.

На фиг. 75 представлены схемы просвечивания стыковых сварных швов, где стрелками указано рекомендуемое направление центрального луча от источника излучения. В зависимости от конкретных условий просвечивания направление пучка лучей

может быть прямо противоположным при соответственном изменении положения кассеты с пленкой.

Просвечивание стыковых сварных швов и выявление в них пороков не вызывает особых затруднений. В случаях, оговоренных ТУ, поток лучей может быть направлен по скосу кромок (как указано на фиг. 75, *г*, *д* пунктирными стрелками) с тем, чтобы выявить возможные непровары по кромкам скоса, которые при обычном направлении потока лучей в силу значительного угла между направлением излучения и кромкой скоса не всегда могут быть выявлены.



Фиг. 75. Схема просвечивания стыковых сварных швов: *а* — без скоса кромок; *б* — со скосом одной кромки; *в* — с U-образной разделкой кромок; *г* — со скосом двух кромок; *д* — с X-образной разделкой кромок.

На фиг. 76, *а* показаны типы сварных соединений, просвечивание которых не гарантирует выявления всех имеющихся в них пороков. Особенно затруднительно просвечивать тавровые соединения без скоса кромок. В этом случае рекомендуется направлять поток лучей под углом 10—15° к плоскости вертикального листа и производить съемки дважды, а для компенсации разницы в толщинах металла, через которые проходят лучи, следует применять клинья из того же металла (фиг. 76, *а*). При этом непровары горизонтальной кромки почти не выявляются, так как лучи источника пересекают кромку под углом 75—80°.

Не лучшим является и вариант просвечивания по схеме, приведенной на фиг. 76, *б*; возникает трудность выявления непроваров как в горизонтальной, так и в вертикальной кромке шва.

Соединение внахлестку (фиг. 76, *в*) можно просвечивать, направляя центральный луч под углом 45°. Однако в этом случае не гарантируется выявление непроваров по плоскостям угла. При направлении луча перпендикулярно плоскости листа (как указано пунктирной стрелкой) не выявляются непровары на горизонтальной плоскости угла. Кроме того, плотность почернения пленки

Таблица 13

Рекомендуемые условия просвечивания стали

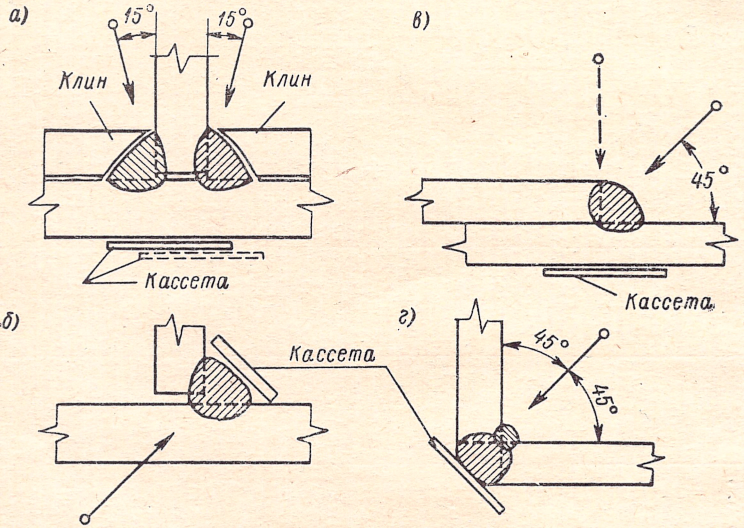
Толщина просвечиваемого металла в *мм*	Условия просвечивания	Просвечивание рентгеновыми лучами	Просвечивание гамма-лучами				
			Тулий-170	Селен-75	Иридий-192	Цезий-137	Кобальт-60
До 8	Оптимальное фокусное расстояние в *см* . . .	50—60	20	30	—	—	—
	Толщина свинцовой фольги в кассете в *мм*	0,05—0,1	0,02—0,1	0,1—0,2	—	—	—
	Применение усиливающего экрана		Не применять		—	—	—
	Рекомендуемая активность радиоактивного препарата в *мг-экв* Ra	—	100—500	100—1000	—	—	—
8—15	Оптимальное фокусное расстояние в *см* . . .	50—60	20	30	20	—	—
	Толщина свинцовой фольги в кассете в *мм* . .	0,05—0,1	0,02—0,1	0,1—0,2	0,2—0,4	—	—
	Применение усиливающих экранов	Не применять	Применять	Применять при большой экспозиции	Не применять	—	—
	Рекомендуемая активность радиоактивного препарата в *мг-экв* Ra	—	500	200—1750	200—2000	—	—
15—25	Оптимальное фокусное расстояние в *см* . . .	50—60	—	35	30	—	—
	Толщина свинцовой фольги в кассете в *мм* . .	0,2—0,4	—	0,2	0,2—0,4	—	—
	Применение усиливающих экранов	Применять	—	Применять при большой экспозиции	Не применять	—	—
	Рекомендуемая активность радиоактивного препарата в *мг-экв* Ra	—	1000—2000	1000—2000	2000—5000	—	—

25—40	Оптимальное фокусное расстояние в *см* . . .	50—60	—	—	35	40	—
	Толщина свинцовой фольги в кассете в *мм*	0,2—0,4	—	—	0,2—0,4	1—2	—
	Применение усиливающих экранов	Применять	—	—	Применять при большом времени экспозиции		—
	Рекомендуемая активность препарата в *мг-экв* Ra	—	—	—	5000—10 000	5000—10 000	—
40—70	Оптимальное фокусное расстояние в *см* . . .	—	—	—	45	50	50
	Толщина свинцовой фольги в кассете в *мм*	—	—	—	0,2—0,4	0,2—0,4	0,8—1,5
	Применение усиливающих экранов	—	—	—	Применять	Применять при большом времени экспозиции	
	Рекомендуемая активность радиоактивного препарата в *мг-экв* Ra	—	—	—	10 000—20 000	10 000—20 000	2000—5000
	Толщина свинцовых крышек дополнительной кассеты в *мм*	—	—	—	3—5	5—7	—
70—100	Оптимальное фокусное расстояние в *см* . . .	—	—	—	—	50	50
	Толщина свинцовой фольги в кассете в *мм*	—	—	—	—	0,2—0,4	0,2—0,4
	Применение усиливающих экранов	—	—	—	—	Применять при большом времени экспозиции	
	Рекомендуемая активность радиоактивного препарата в *мг-экв* Ra	—	—	—	—	2000 и выше	5000
	Толщина свинцовых крышек дополнительной кассеты в *мм*	—	—	—	—	7—10	10

по краям снимка будет различной из-за разной толщины металла, через которую проходят лучи. В этом случае, так же как и при просвечивании тавровых соединений, рекомендуется применять компенсирующие клинья.

При просвечивании угловых швов поток лучей должен быть направлен по биссектрисе угла, образуемого свариваемыми элементами, как указано на фиг. 76, *г*.

Просвечивание гамма-лучами кольцевых швов цилиндриче-



Фиг. 76. Схема просвечивания тавровых и угловых швов: *а* — двустороннее тавровое соединение без скоса кромок ; *б* — одностороннее тавровое соединение без скоса кромок; *в* — соединения внахлестку; *г* — угловое соединение с подваркой.

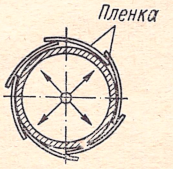
ских изделий может быть осуществлено различными способами. В частности, если диаметр изделия и швы доступны для просвечивания за одну экспозицию, источник излучения помещается в центре изделия против шва и фотографирование осуществляется на несколько кассет, расположенных по кольцу (фиг. 77) так, чтобы их концы перекрывали друг друга на 10—15 *мм*. Если же кольцевые швы не доступны для просвечивания за одну экспозицию, тогда источник излучения помещается с наружной стороны под углом к оси изделия и фотографирование производится через две стенки (фиг. 78).

Кольцевые и продольные швы могут также просвечиваться по схеме, приведенной на фиг. 79.

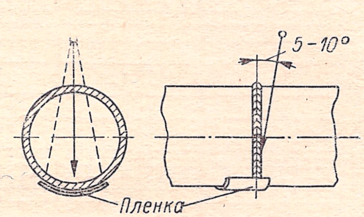
Время экспозиции, как указано выше, зависит от многих факторов и определяется по графику с последующим уточнением опытным просвечиванием.

На фиг. 80, 81, 82 и 83 приведены графики экспозиций при гаммаграфировании стали различными радиоактивными изотопами.

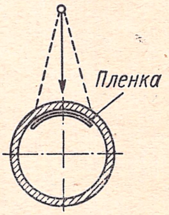
Определение времени экспозиции при пользовании указанными графиками можно показать на следующем примере.



Фиг. 77. Схема просвечивания кольцевых швов гамма-лучами.

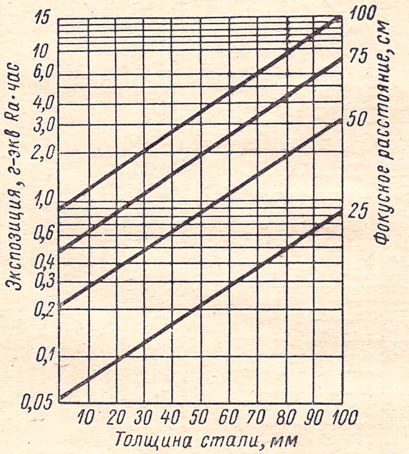


Фиг. 78. Схема просвечивания кольцевых швов через две стенки.

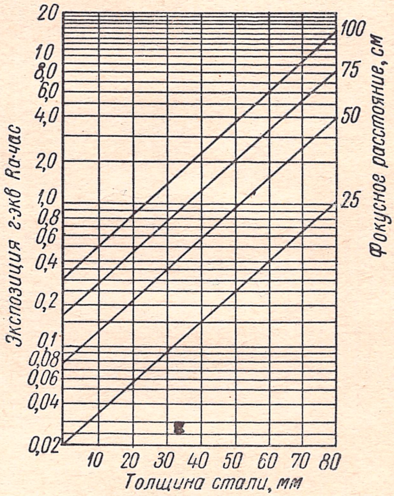


Фиг. 79. Схема просвечивания кольцевых швов.

Пусть требуется определить время просвечивания сварного стального соединения толщиной 30 *мм* при фокусном расстоянии

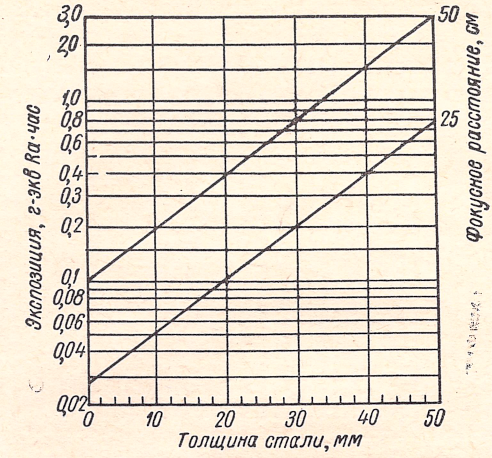


Фиг. 80. Номограмма для определения экспозиций просвечивания стали гамма-лучами Cs^{137} (плотность 1,5; пленка «Рентген X»; свинцовая фольга толщиной 0,1—0,2 *мм*).

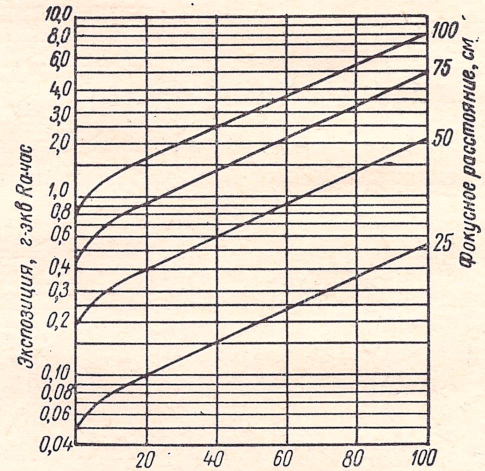


Фиг. 81. Номограмма для определения экспозиций просвечивания стали гамма-лучами Ir^{192} (плотность 1,5; пленка «Рентген X»; свинцовая фольга толщиной 0,1—0,2 *мм*).

$f = 50$ *см* радиоактивным препаратом Cs^{137} активностью 2 *г-экв* Ra и просвечивании на пленку «Рентген X» с применением листов свинцовой фольги толщиной 0,1—0,2 *мм*.



Фиг. 82. Номограмма для определения экспозиций просвечивания стали гамма-лучами Se^{75} (плотность 1,5; пленка «Рентген X»; свинцовая фольга толщиной 0,1—0,2 *мм*).



Фиг. 83. Номограмма для определения экспозиций просвечивания стали гамма-лучами $Eu^{152, 154}$ (плотность 1,5; пленка «Рентген X»; свинцовая фольга толщиной 0,1—0,2 *мм*).

По графику фиг. 80 для данного случая находим экспозицию, равную 0,48 *г-экв* Ra. Время просвечивания при активности препарата, равной 2 *г-экв* Ra, будет:

$$t_{np} = \frac{0,48}{2} = 0,24 \text{ час.} = 14,5 \text{ мин.}$$

Для этой же толщины при прочих равных условиях, пользуясь препаратом Ir^{192}, по фиг. 83 определяем время просвечивания:

$$t_{np} = \frac{0,35}{2} = 0,175 \text{ час.} = 10,5 \text{ мин.}$$

При иных условиях гаммаграфирования (применение флуоресцирующих экранов, других толщин свинцовой фольги, пленки «Рентген XX») необходимо пользоваться поправочными коэффициентами, приведенными в табл. 14.

Таблица 14

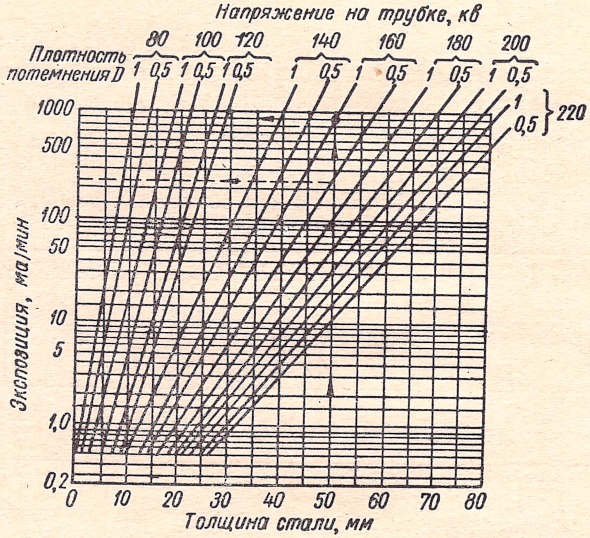
Поправочные коэффициенты для различных радиоактивных изотопов

Способ зарядки кассет	Пленка «РентгенX»						Пленка «Рентген XX»					
	Co^{60}	Cs^{137}	Eu^{154}	Ir^{192}	Eu^{155}	Tu^{170}	Co^{60}	Cs^{137}	Eu^{154}	Ir^{192}	Eu^{155}	Tu^{170}
Пленка без фольги и экранов	2	2,5	2,6	2,7	2	2	—	1,25	1,25	1,35	1	1
Пленка между листами свинцовой фольги толщиной (в *мм*):												
0,02/0,05	—	—	—	—	0,9	0,85	—	—	—	—	0,45	0,4
0,05/0,05	1	1	1	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
0,05/0,1	1	1	1	1	1	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5
0,1/0,1	1	1	1	1	1,2	1,2	0,5	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6
0,1/0,2	1	1	1	1	1,2	1,2	0,5	0,5	0,8	0,5	0,6	0,6
0,2/0,2	1	1,1	1,1	1,2	1,5	1,6	0,5	0,55	0,55	0,6	0,75	0,8
Пленка между флуоресцирующими экранами плотностью 40/120 *мг/см*²	0,4	0,28	0,3	0,3	0,28	0,33	0,4	0,25	0,25	0,28	0,25	0,35

На фиг. 84 представлена номограмма для определения времени экспозиции при просвечивании стали рентгеновыми лучами и зарядке кассет двумя усиливающими экранами плотностью 30 *мг/см*² (передний) и 120 *мг/см*² (задний) при фокусном расстоянии, равном 60 *см*.

Рассмотрим на примере, как пользоваться этим графиком для определения экспозиции.

Допустим, требуется подвергнуть рентгенографированию сталь толщиной 50 *мм* при напряжении на трубке 160 *кв* и токе 5 *ма*. Для этого из точки на оси абсцисс, соответствующей толщине 50 *мм*, восстанавливаем перпендикуляр до пересечения с линией, соответствующей напряжению 160 *кв* с плотностью потемнения 0,5, и из этой точки проводим линию, параллельную оси абсцисс до пересечения с осью ординат, на которой и получаем экспозицию 125 *ма/мин*. Разделив найденную величину на силу тока 5 *ма*, получаем время экспозиции, равное 25 мин.



Фиг. 84. Номограмма для определения экспозиции при просвечивании рентгеновыми лучами (фокусное расстояние 60 *см*, два усиливающих экрана).

Для получения плотности потемнения негатива, равной единице, экспозиция будет равна 900 *ма/мин*, а время экспозиции соответственно будет 900 : 5 = 180 мин. С увеличением напряжения на трубке время экспозиции будет уменьшаться.

Для обеспечения высококачественных снимков, а следовательно, и наиболее четких результатов, при контроле просвечиванием необходимо:

1) кассету с пленкой устанавливать так, чтобы основной пучок лучей проходил через середину просвечиваемого участка и облучал всю пленку;

2) источник излучения приводить в действие только после установки и закрепления кассеты;

3) не подвергать сотрясению или вибрации контролируемый объект и источник облучения в процессе просвечивания;

4) не задерживать проявление снимков на срок более суток после того, как произведено просвечивание;

5) производить проявление и фиксирование в фотокомнате, имеющей специальное оборудование;

6) для проявления и фиксирования пленки применять стеклянные, фарфоровые, пластмассовые или эмалированные металлические кюветы и бачки;

7) проявлять снимки, ставя их в вертикальное положение;

8) сушить пленку в сухом и чистом помещении при комнатной температуре или в сушильных шкафах при температуре не выше 25° С.

Порядок расшифровки снимков и оценки качества шва установлен ГОСТ 7512—55. По ГОСТ на снимке должно быть:

1) изображение всего участка контролируемого шва;

2) изображение маркировочных знаков и эталона чувствительности (за исключением случаев, не допускающих установки эталона).

Снимок не должен иметь пятен, царапин, полос и повреждений эмульсионного слоя пленки, затрудняющих его расшифровку.

Снимки рассматривают при помощи негатоскопа с матовым или молочно-белым стеклом, дающим рассеянный свет, что создает лучшие условия для расшифровки по сравнению с просмотром при дневном свете или свете электрической лампочки.

При контроле паровых котлов и сосудов, работающих под давлением, а также трубопроводов швы признаются неудовлетворительными, если на рентгеновском или гамма-снимке будут видны следующие пороки:

1) трещины любых размеров;

2) непровары по сечению шва;

3) непровары в вершине шва в соединениях, недоступных подварке с обратной стороны (главным образом в трубопроводах, если это оговорено ТУ), глубиной свыше 15% от толщины стенки, если она не больше 20 *мм*, и свыше 3 *мм* при бóльших толщинах;

4) шлаковые включения или раковины по группе А и В (ГОСТ 7512—55) размером по высоте шва более 10% от толщины стенки, если она не превышает 20 *мм*, а также более 3 *мм* при толщине стенки, превышающей 20 *мм*;

5) шлаковые включения, расположенные цепочкой или сплошной линией вдоль шва по группе Б, при суммарной их длине, превышающей 200 *мм* на 1 *м* шва;

6) газовые поры, расположенные в виде сплошной сетки;

7) скопление газовых пор в отдельных участках шва по группе В в количестве свыше 5 шт. на 1 *см*^{2} площади поперечного сечения шва.

Оценка видимых на снимке пороков производится по эталонам на основе сравнения полученных при контроле снимков с эталонными.

Если при просвечивании одного из участков сварного шва обнаружен один из перечисленных пороков, свидетельствующий о неудовлетворительном качестве, то дополнительно просвечивают

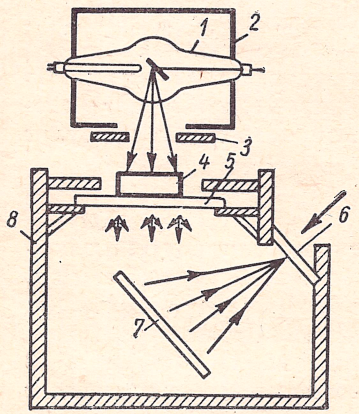
два соседних участка по обе стороны от первого. Если дополнительным просвечиванием установлено удовлетворительное качество, то на этом просвечивание прекращается; в противном случае дополнительно просвечиваются следующие соседние участки до тех пор, пока не будет установлено удовлетворительное качество.

Швы, признанные неудовлетворительными, вырубаются, завариваются и вновь просвечиваются в обязательном порядке.

В других отраслях производства качество сварных швов и допустимость тех или иных пороков в них определяется техническими условиями, правилами и нормами на изготовление сварных конструкций.

Визуальный и ионизационный методы контроля просвечиванием

В и з у а л ь н ы й м е т о д к о н т р о л я основан на свойстве рентгеновых лучей вызывать люминесценцию некоторых солей и тем самым создавать светотеневую картину, позволяющую видеть пороки шва непосредственно на люминесцирующем экране. В качестве вещества, наносимого на картонный экран при визуальном методе, используется сернистый кадмий с цинком, активизированные серебром — ZnCdS(Ag), имеющий характерное желто-зеленое свечение, хорошо воспринимаемое глазом.



Фиг. 85. Схема обычного визуального метода контроля:

1 — рентгеновская трубка; *2* — свинцовый защитный кожух; *3* — свинцовая диафрагма; *4* — просвечиваемое изделие; *5* — люминесцирующий экран; *6* — свинцовое стекло; *7* — зеркало; *8* — деревянный ящик, обитый изнутри свинцом.

Схема обычного способа визуального контроля представлена на фиг. 85. Рентгеновы лучи, пройдя через контролируемый объект, вызовут разную степень освещенности экрана в зависимости от его сплошности и вследствие разной интенсивности рентгеновых лучей, прошедших через объект. При этом на экране получается более яркое свечение тех мест сварных швов, где имеются пороки.

На яркость свечения экрана оказывают влияние:

1) мощность дозы излучения (*р/сек*); при одном и том же качестве рентгеновых лучей яркость свечения будет тем больше, чем больше доза излучения;

2) фокусное расстояние (расстояние от источника излучения до экрана); яркость свечения обратно пропорциональна квадрату этого расстояния. Таким образом, уменьшение фокусного расстояния вдвое увеличивает яркость свечения в четыре раза.

Визуальный метод контроля применяется для просвечивания небольших толщин (стали — до 15 *мм*, легких сплавов — до 50 *мм*).

Основным его недостатком является более низкая чувствительность к выявлению дефектов по сравнению с просвечиванием на пленку. Мелкие трещины визуальным методом не выявляются. Поры в сварных швах легких сплавов толщиной до 50 *мм* не обнаруживаются, если их диаметр меньше 5% просвечиваемой толщины; в сварных швах из стали толщиной до 10 *мм* выявляются поры диаметром не менее 8% от толщины.

Преимущество визуального метода заключается в высокой производительности, вследствие отсутствия затрат времени на зарядку кассет и фотообработку пленок, а также в экономичности (отсутствие затрат средств на пленку и фотохимикаты).

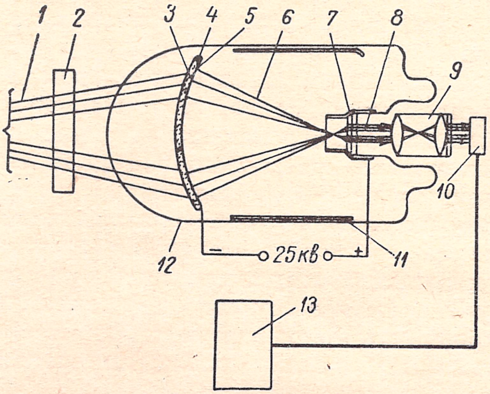
Этот метод применяют при контроле изделий из легких сплавов в авиационной промышленности и стальных тонкостенных изделий в других отраслях промышленности.

При необходимости иметь документ, объективно свидетельствующий о качестве сварного соединения, можно изображение, видимое на экране, сфотографировать фотоаппаратом и рассматривать пленку с зафиксированным изображением при помощи проекционного фонаря или отпечатать увеличенное изображение на фотобумагу.

Другим способом визуального контроля сварных швов и соединений является контроль с помощью *электронно-оптического преобразователя*. Этот способ стал применяться за рубежом недавно и заключается в том, что невидимые рентгеновы лучи преобразуются в видимые с усилением яркости изображения в тысячу раз.

Электронно-оптический преобразователь, принципиальная схема которого представлена на фиг. 86, состоит из электровакуумной трубки, источника постоянного тока напряжением 20—25 *кв* и оптической системы. Рентгеновы лучи, пройдя через сварное изделие, попадают на алюминиевый экран электровакуумной трубки, покрытой люминесцирующим составом и гладкой пленкой. На пленку нанесен фотокатод, а напротив расположен анод. Снаружи трубки смонтирована оптическая система для наблюдения изображения. Рентгеновы лучи, пройдя через контролируемый объект, попадают на алюминиевый экран с люминесцирующим составом, при этом каждый квант рентгеновых лучей преобразуется в 7500 световых квантов, которые выбивают из фотокатода примерно 450 электронов на каждый поглощенный световой квант. Фотоэлектроны под действием электростатического поля движутся от катода к аноду, где они преобразуются в видимый световой поток. Изображение, полученное на аноде, усиленное в 1000 раз, увеличивается при помощи оптической системы в 6—8 раз и доводится до нормальных размеров. Изображение может или восприниматься глазом наблюдателя непосред-

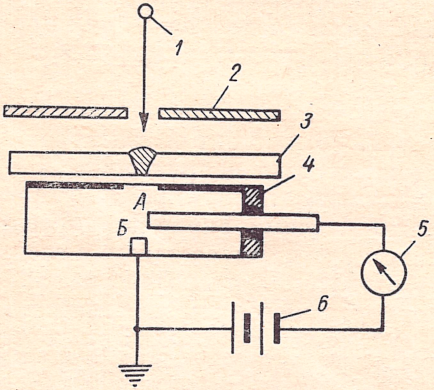
ственно, или сфотографировано на пленку, или передано на экран при помощи телевизионного устройства.



Фиг. 86. Принципиальная схема электронно-оптического преобразователя:

1 — рентгеновы лучи; *2* — просвечиваемый объект; *3* — алюминиевый экран; *4* — флуоресцирующий состав; *5* — фотокатод; *6* — фотоэлектроны; *7* — анод; *8* — световой поток; *9* — оптическая линза; *10* — окуляр (или кинофотоаппарат); *11* — металлизированный экран; *12* — стеклянная колба; *13* — экран телевизора.

Этим способом можно контролировать сталь толщиной до 20 *мм* и алюминий до 125 *мм* при напряжении на рентгеновской трубке 125 *кв.*



Фиг. 87. Схема ионизационного метода контроля:

1 — источник излучения; *2* — диафрагма; *3* — контролируемое изделие; *4* — ионизационная камера; *5* — гальванометр; *6* — батарея гальванических элементов.

Используя более высокое напряжение, можно просвечивать сталь толщиной до 40 *мм* и выше. Чувствительность метода достигает 1%. Скорость контроля достаточно высокая — около 5 *м/мин.*

Применяют электронно-оптические преобразователи с диаметром экрана 120 и 300 *мм* в комплекте с рентгеновским аппаратом.

Ионизационный метод контроля основан на том, что рентгеновы лучи, проходящие через газ, частично в нем абсорбируются и рентгеновские кванты вызывают фотоэффект. Возникающие в этом процессе фотоэлектроны ионизируют газ, т. е. превращают нейтральные молекулы и атомы в заряженные ионы, в результате чего газ или воздух становится токопроводящим.

На фиг. 87 представлена принципиальная схема ионизационного метода контроля сварного соединения. В качестве источника излучения *1* здесь могут быть использованы рентгеновы или гамма-лучи, которые, пройдя через контролируемое изделие *3*, попадают в ионизационную камеру *4*, ионизируют газ или воздух, находящиеся в камере, в результате чего между металлическими пластинками *А* и *Б*, подключенными к батарее гальванических элементов *6*, потечет ток, обнаруживаемый гальванометром *5* или другим чувствительным прибором. Сила ионизационного тока в камере, а следовательно, и показания прибора будут пропорциональны интенсивности лучей, прошедших через испытуемый объект и попавших в камеру. Последнее при прочих равных условиях зависит от дефектов в сварном соединении и их размера: чем больше дефектов, тем выше интенсивность лучей.

Таким образом, по величине отклонения стрелки прибора можно судить о наличии в сварном соединении тех или иных недостатков. Характер этих недостатков и расположение дефектов в сварных соединениях ионизационным методом определить нельзя. Следовательно, этим методом можно выявить в контролируемом изделии только нарушение сплошности.

Преимуществами ионизационного метода по сравнению с фотометодом являются:

1) более высокая производительность;

2) экономичность вследствие отсутствия затрат на фотоматериалы и обработку пленки;

3) возможность контроля больших толщин.

К числу недостатков можно отнести:

1) невозможность установления характера дефекта;

2) малую чувствительность, не позволяющую выявить мелкие поры и трещины, вследствие чего метод с использованием ионизационных камер может применяться для выявления только довольно крупных дефектов.

ГЛАВА V

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПРОЧНОСТИ И ГЕРМЕТИЧНОСТИ СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ И СОЕДИНЕНИЙ

13. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ КОНСТРУКЦИЙ

Контроль качества внешним осмотром и обмером сварных швов

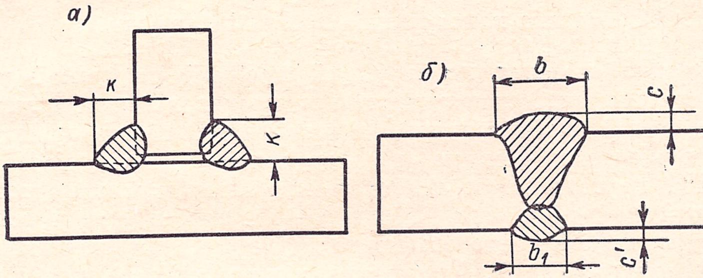
Контроль качества выполненной сварной конструкции путем внешнего осмотра и обмера протяженности швов регламентируется ГОСТ 3242—54 и является основным и обязательным для любой конструкции. Этот метод контроля предшествует всем другим и его задачей является выявление всех наружных пороков.

Так как при внешнем осмотре контролируется состояние поверхности швов и зон, прилегающих к ним, то перед контролем производится очистка швов и прилегающих к ним поверхностей основного металла (на 20 *мм* с каждой стороны шва) от шлака, брызг и других загрязнений, мешающих осмотру.

При внешнем осмотре можно рекомендовать использование лупы с 10-кратным увеличением, что облегчает выявление трещин в шве и околошовной зоне, не обнаруживаемых невооруженным глазом.

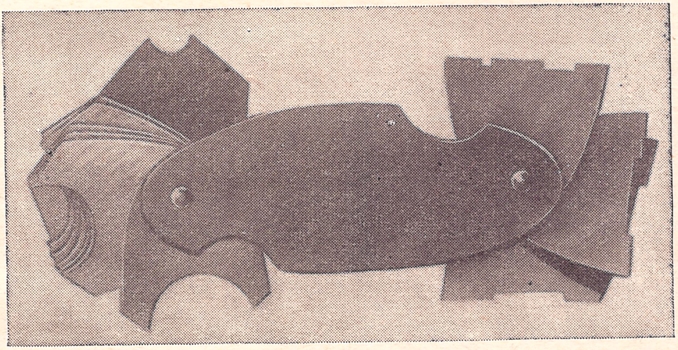
На основе внешнего осмотра при достаточном практическом опыте можно делать некоторые выводы и о внутреннем качестве сварного соединения. Так, например, если при внешнем осмотре шва, выполненного электрошлаковой сваркой, наблюдается местное уменьшение его ширины, то здесь можно предполагать местный непровар, вызванный временным прекращением процесса сварки и соответственно охлаждением сварочной ванны. Или, если имеется подрез с одной стороны шва и наплыв с другой, то под наплывом можно предполагать наличие непровара. Поры, выходящие на поверхность, дают основание предполагать внутреннюю пористость. Грубая неравномерная чешуйчатость шва указывает на вероятность местных непроваров, шлаковых включений и т. д.

Наряду с внешним осмотром проверяют соответствие размеров швов проектным, а также правильность сопряжения элементов конструкции, общие ее размеры и отклонения в размерах в связи с остаточными деформациями.



Фиг. 88. Элементы угловых (*а*) и стыковых (*б*) сварных швов, измеряемые при контроле.

Например, в угловых сварных швах измеряют размеры катетов k, (фиг. 88, *а*), а в стыковых швах определяют ширину b, высоту c усиления, ширину подварки b_1 (фиг. 88, *б*). В прерывистых угловых швах проверяют длину шпонок заваренных участков, их катеты и шаг между ними.



Фиг. 89. Набор шаблонов для измерения размеров сварных швов.

Измерение размеров швов, а также других размеров конструкций производится с помощью различных шаблонов и других измерительных инструментов и приспособлений. Простейшим инструментом для измерения размеров швов является набор шаблонов (фиг. 89), с помощью которых можно измерить размеры стыковых и угловых швов. Такими наборами шаблонов должен снабжаться каждый сварщик.

Таким образом, контроль внешним осмотром и обмером сварной конструкции является весьма эффективным и в целом ряде случаев заключение о качестве не особо ответственных сварных конструкций дают на основании внешнего осмотра и обмера.

Испытание конструкций пробной нагрузкой

Испытание сварных конструкций пробной нагрузкой чаще всего является завершающим этапом производства и осуществляется после окончательного изготовления таких конструкций, как железнодорожные и автодорожные мосты, мостовые, стреловые, портальные и козловые краны и другие подъемно-транспортные сооружения. Железнодорожные и автодорожные мосты испытывают после их монтажа персоналом специальных испытательных станций. Испытания же грузоподъемных сооружений производятся или непосредственно на заводе-изготовителе отделом технического контроля, если конструкция отправляется заказчику полностью в собранном виде, или на месте монтажа в присутствии представителя Госгортехнадзора. При таких испытаниях желательно воспроизводить те условия, при которых будет эксплуатироваться испытуемое сооружение, хотя это и не всегда возможно.

Близко к реальным условиям испытание конструкций пробной нагрузкой, например испытание железнодорожных и автодорожных мостов.

Перед испытанием моста проверяют соответствие геометрических размеров пролетных строений и сечений их элементов проектным, а также качество сварочных и монтажных работ.

Испытания подразделяются на статические и динамические.

Статические испытания заключаются в следующем.

1. Намечают наиболее напряженные места конструкции (обычно места крепления фасонок) и составляют схему размещения нагрузок с таким расчетом, чтобы вызвать в элементах конструкции наибольшие усилия, близкие к расчетным или превосходящие их.

2. В намеченных местах устанавливают датчики сопротивления, или тензометры, для необходимых измерений.

3. Пролет нагружают в соответствии с намеченной схемой. В качестве нагрузок при испытании железнодорожных мостов обычно используют тяжелые паровозы или паровозы с тяжело нагруженными составами, при испытании автодорожных мостов — автомобили типа МАЗ-25. При испытании моста «Строителей» в г. Ленинграде было использовано 8 тяжелых танков общим весом 288 *т*.

Каждый вариант нагружения, соответственно принятой схеме, повторяют 2—3 раза и каждый раз измеряют прогибы, перемещения и напряжения при помощи установленных датчиков и

тензометров, беря за окончательный результат среднее из трех измерений.

Динамические испытания заключаются в следующем.

1. Осуществляют нагружение моста путем сплотки тяжелых паровозов (двух, трех и т. д.), пропускаемых по мосту в обоих направлениях с различной скоростью (от 5 до 75 *км/час*).

2. При помощи самопишущего прогибомера Гейгера или осциллографа определяют величину прогиба при движущейся нагрузке, а при помощи датчиков в некоторых элементах конструкции измеряют напряжения.

Основные задачи испытания пробной нагрузкой таких конструкций, как железнодорожные и автодорожные мосты, заключаются в том, чтобы выявить соответствие действительной работы конструкции расчетным предпосылкам и установить наиболее напряженные места конструкции с последующим учетом недостатков ее при разработке типового проекта или нового варианта.

После испытания пробной нагрузкой проводится окончательный осмотр конструкции с целью исследования влияния испытательных нагрузок на сварные соединения пролетных строений.

Испытания различных грузоподъемных кранов с целью проверки общей прочности конструкций и прочности отдельных их элементов проводятся в соответствии с правилами Госгортехнадзора СССР и разделяется на статическое и динамическое. В качестве пробной нагрузки обычно используют грузы соответствующего веса, которые составляют из разновесов, изготовленных из металла или железобетона. Правила Госгортехнадзора СССР разрешают нагружать краны при статических испытаниях специальными устройствами, позволяющими создать необходимую пробную нагрузку.

Статическое испытание кранов и других грузоподъемных машин производится нагрузкой, на 25% превышающей грузоподъемность испытуемой конструкции.

Сущность испытаний сводится к следующему.

1. Испытуемые мостовые и подвижные консольные краны устанавливают над опорами подкрановых путей, а тележку (тележки) — в положение, соответствующее наибольшему прогибу. Затем крюком захватывают груз и поднимают на высоту около 100 *мм* с последующей выдержкой в течение 10 мин. По истечении этого времени нагрузку снимают и проверяют отсутствие остаточной деформации фермы крана, а также тщательно осматривают сварные соединения для установления их качества после приложения нагрузки.

2. Стреловые, башенные, железнодорожные, автомобильные, гусеничные и другие краны, имеющие механизм изменения вылета стрелы, испытывают дважды — при наименьшем и наибольшем вылете стрелы.

Динамическое испытание грузоподъемной машины производится наибольшей нагрузкой, на которую рассчитана конструк-

ция, и имеет целью проверку действия механизмов машины и тормозов. При этом испытании осуществляют повторный подъем и опускание груза, перемещение машины с грузом по подкрановым путям, торможение.

После испытания качество сварной конструкции вновь проверяют путем внешнего осмотра.

Данные осмотра испытания крана вносятся в паспорт.

Гидравлические испытания

Пробной гидравлической нагрузкой испытывают замкнутые сосуды типа паровых котлов и сосудов, работающих под давлением, а также трубопроводы. Хотя в правилах устройства и эксплуатации таких конструкций при гидравлических испытаниях и ставится задача проверки прочности конструкции и плотности сварных швов и соединений, однако в действительности при подобных испытаниях создаются такие условия работы конструкции, при которых пробная нагрузка значительно меньше запаса прочности. В этом случае можно говорить лишь о частичной проверке прочности; в основном при гидравлических испытаниях проверяется герметичность сварных швов и соединений.

Пробная нагрузка при таких испытаниях создается путем заполнения сосуда или блока трубопровода водой с последующим созданием при помощи гидравлического пресса гидростатического давления. Величина давления устанавливается в зависимости от типа, назначения и условий работы конструкции и обычно превышает рабочее давление в 1,25—1,5 раза. Так, например, сосуды, работающие с температурой стенки свыше 400° С, подвергают гидравлическому испытанию давлением, которое превышает рабочее не менее чем в 1,5 раза. Величина пробного давления, превышающего рабочее в 1,5 раза, устанавливается проектной организацией. Блоки паропроводов и трубопроводов горячей воды испытывают пробной нагрузкой, превышающей рабочее давление в 1,25 раза.

Гидравлическое испытание пробной нагрузкой заключается в следующем.

1. Испытуемый объект наполняют водой с таким расчетом, чтобы весь объем был заполнен и никакой воздушной «подушки» не образовалось.

2. Все сварные швы протирают насухо ветошью, обдувают воздухом.

3. Отверстия и люки испытуемого объекта закрывают заглушками с уплотнением, после чего при помощи гидропрессов постепенно создается необходимое давление.

4. После создания установленного для объекта давления дают выдержку в течение 5—10 мин.; затем проверяют качество сварных швов и ведут наблюдение за манометрами, показывающими давление.

Неплотности обнаруживают по капелькам воды, течи или по запотеванию шва и околошовной зоны; эти места отмечают мелом.

Испытуемый сосуд, в котором давление, показываемое манометром, в течение установленного времени остается постоянным, признается выдержавшим испытание.

При наличии в швах недостатков после испытания сосуд освобождают от воды, все дефектные швы вырубают, вновь заваривают и производится повторное гидравлическое испытание пробной нагрузкой.

При гидравлических испытаниях пробной нагрузкой должен быть обеспечен контроль за величиной испытательного давления посредством проверенных манометров, которых следует иметь два (один из них контрольный).

Если по ТУ объект должен подвергаться гамма- или рентгенографированию и гидравлическому испытанию, то последнее производится после контроля просвечиванием рентгеновыми или гамма-лучами и после термической обработки изделия. Когда конструкция отправляется заказчику полностью в собранном виде, испытания осуществляются на заводе-изготовителе работниками отдела технического контроля завода. Если же конструкция монтируется на месте, испытание производится заказчиком в присутствии представителя Госгортехнадзора. В последнем случае представителю контролирующего органа представляются все материалы, характеризующие изготовление контролируемого объекта, в частности данные об основном металле и его механических характеристиках, сведения о способе сварки, присадочных материалах, результатах испытания сварных швов, контрольных стыков, контрольных планок и т. п.

Гидравлические испытания пробным давлением производятся при положительной температуре окружающего воздуха.

Выборочный контроль с частичным или полным разрушением сварных изделий

Выборочный контроль с частичным или полным разрушением конструкции близок к методу пробных нагрузок и имеет целью установление истинной прочности изделия при соответствующем нагружении. Методы выборочного контроля находят применение в условиях массового производства небольших недорогих изделий и определяются техническими условиями на их изготовление.

К подобному виду испытаний относятся следующие.

1. Испытание сварных соединений в местах пересечений стальных элементов арматурных сеток и каркасов, выполненных точечной контактной сваркой и предназначенных для использования в железобетонных конструкциях.

Одновременно с изготовлением каждой партии (партия не более 100 шт.) указанных изделий проверяют прочность сварных узлов путем испытания образцов на срез в количестве 3 шт. от

ния на растяжение, загиб и ударную вязкость в соответствии с ГОСТ 6996—54 и по полученным результатам делают заключение о качестве сварки.

5. К методу контроля с частичным разрушением сварных соединений относится способ местного засверливания, предложенный С. К. Звегинцевым. Способ засверливания применяется для того, чтобы определить качество сварных швов путем выявления в них внутренних пороков — непроваров, шлаковых и газовых включений и трещин как в наплавленном металле, так и по границам сплавления.

Засверливание швов производится после их наружного осмотра и в тех местах, качество которых сомнительно. Засверливают сверлом с углом заточки, равным 90°. Диаметр сверла выбирают таким, чтобы было вскрыто поперечное сечение шва и захвачен основной металл примерно по 1,5 *мм* на сторону. Глубина засверливания зависит от высоты шва и определяется необходимостью вскрыть основные элементы сварного соединения. Стенки засверленного отверстия должны иметь гладкую поверхность, а поэтому желательно засверливать при любом положении сверла, кроме вертикального.

Качество швов определяется сразу же после засверливания или же после протравливания стенок отверстия следующими реактивами:

а) раствором 10 *г* двойной соли хлорной меди и аммония в 100 $см^3$ воды;

б) 10-процентным водным раствором азотной кислоты.

При обнаружении пороков в месте засверливания шов подвергают засверливанию в других местах, прилегающих с обеих сторон к месту первого засверливания на некотором расстоянии от него. Швы с обнаруженными пороками вырубают и заваривают.

Засверливание как угловых, так и стыковых швов дает возможность достаточно точно установить наличие в них внутренних пороков. Однако частичное повреждение шва засверливанием и последующая заварка отверстий свидетельствуют о несовершенстве способа. Поэтому контроль засверливанием применяется сравнительно редко и заменяется другими, более эффективными способами без повреждения швов.

6. В котельной промышленности и ряде других отраслей находит применение способ испытания контрольных пластин, сварные соединения которых служат продолжением основного шва и выполняются в тех же условиях с применением тех же исходных материалов, технологии сварки и сварочных режимов, как и при изготовлении самих изделий. Размеры контрольных пластин должны быть такими, чтобы из них можно было вырезать образцы в соответствии с ГОСТ 6996—54: два для испытаний на растяжение, два на загиб, три на ударную вязкость и образцы для металлографических исследований. Следует назначать такие размеры контрольных пластин, чтобы из оставшейся части можно было

Неплотности обнаруживают по капелькам воды, течи или по запотеванию шва и околошовной зоны; эти места отмечают мелом.

Испытуемый сосуд, в котором давление, показываемое манометром, в течение установленного времени остается постоянным, признается выдержавшим испытание.

При наличии в швах недостатков после испытания сосуд освобождают от воды, все дефектные швы вырубают, вновь заваривают и производится повторное гидравлическое испытание пробной нагрузкой.

При гидравлических испытаниях пробной нагрузкой должен быть обеспечен контроль за величиной испытательного давления посредством проверенных манометров, которых следует иметь два (один из них контрольный).

Если по ТУ объект должен подвергаться гамма- или рентгенографированию и гидравлическому испытанию, то последнее производится после контроля просвечиванием рентгеновыми или гамма-лучами и после термической обработки изделия. Когда конструкция отправляется заказчику полностью в собранном виде, испытания осуществляются на заводе-изготовителе работниками отдела технического контроля завода. Если же конструкция монтируется на месте, испытание производится заказчиком в присутствии представителя Госгортехнадзора. В последнем случае представителю контролирующего органа представляются все материалы, характеризующие изготовление контролируемого объекта, в частности данные об основном металле и его механических характеристиках, сведения о способе сварки, присадочных материалах, результатах испытания сварных швов, контрольных стыков, контрольных планок и т. п.

Гидравлические испытания пробным давлением производятся при положительной температуре окружающего воздуха.

Выборочный контроль с частичным или полным разрушением сварных изделий

Выборочный контроль с частичным или полным разрушением конструкции близок к методу пробных нагрузок и имеет целью установление истинной прочности изделия при соответствующем нагружении. Методы выборочного контроля находят применение в условиях массового производства небольших недорогих изделий и определяются техническими условиями на их изготовление.

К подобному виду испытаний относятся следующие.

1. Испытание сварных соединений в местах пересечений стальных элементов арматурных сеток и каркасов, выполненных точечной контактной сваркой и предназначенных для использования в железобетонных конструкциях.

Одновременно с изготовлением каждой партии (партия не более 100 шт.) указанных изделий проверяют прочность сварных узлов путем испытания образцов на срез в количестве 3 шт. от

каждой партии отобранных изделий, а при наличии в партии нескольких сочетаний диаметров — по 3 шт. на каждое сочетание. Испытания производятся в готовых изделиях ручными клещами при диаметре стержней до 8 *мм* или специальными гидравлическими приборами — при диаметре стержней, превышающем 8 *мм*.

При отсутствии приспособлений для испытания прочности сварных соединений в готовых изделиях испытывают специальные образцы. Образцы изготовляют путем вырезания узлов из каркасов и сеток при диаметре стержней до 8 *мм*, а при диаметре стержней более 8 *мм* — путем сварки узлов из обрезков стержней той же марки стали и на таких же режимах сварки, что и данная партия.

Испытание образцов производится на разрывных машинах с применением специальных захватов.

В условиях монтажа качество указанных сварных соединений может быть проверено следующим упрощенным способом:

1) для соединений из горячекатанной стали диаметром до 10 *мм* концы стержней, выступающих за стержни другого направления загибаются на угол 90° (отрывающее усилие) и возвращаются в обратное положение. Соединение считается доброкачественным, если место сварки не разрушается и в нем не появляются трещины;

2) соединения из стержней любых диаметров разрушают молотком или кувалдой; если в изломе соединения нет пор, раковин, трещин и других пороков, то оно считается доброкачественным.

2. Испытания на механическую прочность стыков стальной арматуры (для железобетонных сооружений), вырезаемых из готовых конструкций в количестве 1% от общего числа стыков [1]. Вырезанные стыки испытывают на растяжение на разрывных машинах и по полученным данным испытаний определяют качество сварных соединений.

3. Испытание сварных стыков в трубчатых элементах поверхностей нагрева с толщиной стенки менее 12 *мм* (в паровых котлах), вырезаемых в количестве 1% от общего числа стыков (но не менее двух стыков на каждого сварщика), с последующими механическими испытаниями в соответствии с ГОСТ 6996—54.

4. Испытание трубопроводов пара, горячей воды и других. Одновременно со сваркой трубопроводов каждый сварщик изготавливает контрольные стыки в количестве 1% для углеродистых и низколегированных сталей и 2% для аустенитных марок сталей от общего числа сваренных стыков, но не менее одного стыка на каждого сварщика. Сварка контрольных стыков производится в тех же условиях, с применением той же технологии, что и трубопровода. Из контрольных стыков изготовляют образцы для испыта-

[1] В последнее время эти испытания начинают заменять менее трудоемким методом — просвечиванием стыков гамма-лучами.

ния на растяжение, загиб и ударную вязкость в соответствии с ГОСТ 6996—54 и по полученным результатам делают заключение о качестве сварки.

5. К методу контроля с частичным разрушением сварных соединений относится способ местного засверливания, предложенный С. К. Звегинцевым. Способ засверливания применяется для того, чтобы определить качество сварных швов путем выявления в них внутренних пороков — непроваров, шлаковых и газовых включений и трещин как в наплавленном металле, так и по границам сплавления.

Засверливание швов производится после их наружного осмотра и в тех местах, качество которых сомнительно. Засверливают сверлом с углом заточки, равным 90°. Диаметр сверла выбирают таким, чтобы было вскрыто поперечное сечение шва и захвачен основной металл примерно по 1,5 *мм* на сторону. Глубина засверливания зависит от высоты шва и определяется необходимостью вскрыть основные элементы сварного соединения. Стенки засверленного отверстия должны иметь гладкую поверхность, а поэтому желательно засверливать при любом положении сверла, кроме вертикального.

Качество швов определяется сразу же после засверливания или же после протравливания стенок отверстия следующими реактивами:

а) раствором 10 *г* двойной соли хлорной меди и аммония в 100 $см^3$ воды;

б) 10-процентным водным раствором азотной кислоты.

При обнаружении пороков в месте засверливания шов подвергают засверливанию в других местах, прилегающих с обеих сторон к месту первого засверливания на некотором расстоянии от него. Швы с обнаруженными пороками вырубают и заваривают.

Засверливание как угловых, так и стыковых швов дает возможность достаточно точно установить наличие в них внутренних пороков. Однако частичное повреждение шва засверливанием и последующая заварка отверстий свидетельствуют о несовершенстве способа. Поэтому контроль засверливанием применяется сравнительно редко и заменяется другими, более эффективными способами без повреждения швов.

6. В котельной промышленности и ряде других отраслей находит применение способ испытания контрольных пластин, сварные соединения которых служат продолжением основного шва и выполняются в тех же условиях с применением тех же исходных материалов, технологии сварки и сварочных режимов, как и при изготовлении самих изделий. Размеры контрольных пластин должны быть такими, чтобы из них можно было вырезать образцы в соответствии с ГОСТ 6996—54: два для испытаний на растяжение, два на загиб, три на ударную вязкость и образцы для металлографических исследований. Следует назначать такие размеры контрольных пластин, чтобы из оставшейся части можно было

вырезать дополнительно удвоенное против указанного количество образцов.

Целью испытаний является определение прочности и пластичности сварных соединений. Однако подобные механические испытания вообще не могут в достаточной мере характеризовать качество сварных соединений и конструкции в целом. Например, испытания на растяжение почти никогда не служат основанием для браковки конструкции. Единственным поводом для браковки является неудовлетворительный результат испытаний образцов на загиб, т. е. тогда, когда получают меньший угол загиба, чем требуется. Но испытания на загиб не позволяют определить свойства металла сварного соединения, так как они характеризуют лишь соотношение свойств основного и наплавленного металла. Это соотношение зависит, прежде всего, от предела текучести основного металла и металла шва. Уменьшение предела текучести металла шва по сравнению с пределом текучести основного металла всегда сопровождается уменьшением угла загиба, и наоборот. Следовательно, на практике необходимо стремиться к тому, чтобы предел текучести металла шва был бы равен пределу текучести основного металла или несколько выше его. Соотношение же свойств основного металла и наплавленного должно определяться в процессе разработки технологии сварки путем выбора и назначения соответствующих сварочных материалов (электродов, сварочной проволоки, флюсов и т. п.). Если эти соотношения установлены, то нет никакой необходимости в последующих механических испытаниях.

14. МЕТОДЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ГЕРМЕТИЧНОСТИ

Ко многим готовым сварным изделиям предъявляется требование герметичности по отношению к различным жидкостям и газам. Это требование обусловливается назначением конструкции — характером ее эксплуатации и предусматривается техническими условиями, правилами и нормами изготовления. На герметичность испытывают различные сосуды под жидкости и газы (цистерны, резервуары, газгольдеры, бензобаки и т. д.), трубопроводы, судовые конструкции и т. п.

В практике находят применение различные методы контроля герметичности. Остановимся на некоторых из них, наиболее широко распространенных.

Пневматический метод

Пневматические испытания сварных изделий воздухом применяют обычно для определения непроницаемости сварных соединений различных сосудов, работающих без давления и под давлением.

Сущность пневматических испытаний сводится к тому, что контролируемое изделие подвергают давлению сжатым воздухом,

величина которого устанавливается техническими условиями на изготовление данного типа изделия.

Выявление неплотностей в сварных соединених осуществляется двояким способом:

1. В случае больших размеров изделия после создания необходимого давления сварные швы покрывают мыльным раствором (100 *г* хозяйственного мыла на 1 *л* воды) и ведут за ними наблюдение. В местах, имеющих неплотности, появляются мыльные пузырьки или вспенивание мыльного раствора, свидетельствующие о наличии в этих местах каких-то пороков (трещин, сквозных непроваров, пор, свищей и т. п.). Такие места в процессе контроля отмечают мелом и после испытания исправляют путем вырубки, последующей заварки, а затем повторно испытывают.

2. При небольших размерах изделий (типа авиационных и автомобильных бензобаков) испытание производится путем погружения изделия в воду с последующим созданием давления воздухом. Наличие неплотностей определяется по воздушным пузырькам, поднимающимся на поверхность воды. Обнаруженные участки с неплотностями отмечают мелом, подваривают и вновь подвергают испытанию.

Кроме того, в судостроительной промышленности применяют контроль сварных соединений обдуванием их струей воздуха, подаваемого под давлением 4—5 *ат*, с одновременным обмазыванием сварных швов мыльным раствором со стороны, противоположной обдуванию. При этом ниппель шланга, по которому подается воздух, располагают на расстоянии не менее 50 *мм* от шва. Направление струи воздуха к плоскости расположения шва должно быть перпендикулярным. Наличие неплотностей определяют по пузырькам или вспениванию мыльного раствора.

Пневматические испытания замкнутых объектов в связи со сжимаемостью воздуха представляют серьезную опасность по сравнению с гидравлическими и поэтому при таких испытаниях должны приниматься меры предосторожности, предусмотренные специальными инструкциями и правилами.

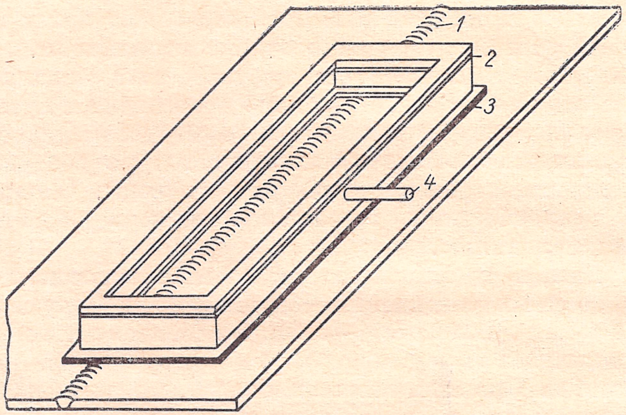
Вакуумный метод

Вакуумный метод определения плотности является одним из наиболее эффективных. Суть одного из способов заключается в том, что испытуемая емкость изолируется от внешней атмосферы путем откачки из нее воздуха с последующей проверкой вакуума. Если в сварных соединениях имеются незначительные неплотности, то вакуум будет быстро нарушаться. Однако этот способ позволяет получить только общую оценку качества сварного сосуда, но не дает ответа на вопрос, где же неплотность.

Институт электросварки разработал новый прибор — вакуумный дефектоскоп, позволяющий испытывать отдельные участки сварных швов на герметичность. Дефектоскоп (фиг. 90) представляет собой камеру с прозрачной крышкой из плексигласа и

открытым дном. По периметру дна камеры наклеено уплотнение из губчатой резины.

Испытуемый участок сварного шва очищают от шлака и брызг, смазывают мыльным раствором и накрывают камерой. При помощи вакуумного насоса из камеры выкачивают воздух, создают вакуум, и вследствие этого атмосферным давлением камера плотно прижимается к поверхности испытуемого участка шва. При наличии неплотностей через прозрачную крышку будут видны лопающиеся мыльные пузырьки или вспенивание мыльного раствора. Мыльный раствор должен приготовляться такой консистенции, чтобы он



Фиг. 90. Камера для испытания участков сварных швов на герметичность:

1 — испытуемый шов; *2* — крышка из плексигласа; *3* — уплотнение; *4* — штуцер к вакуумному насосу.

не стекал при контроле швов, расположенных на наклонной или вертикальной плоскостях.

Удобство этого способа заключается в том, что можно проверить любой участок шва, не подвергая испытанию всю конструкцию, а также возможен контроль при одностороннем доступе к шву. Для контроля швов, расположенных на поверхностях различных очертаний, должен быть изготовлен набор камер.

В зависимости от пространственного положения шва и конфигурации испытуемых участков производительность способа достигает 500 *пог. м* за смену.

Гидравлический метод

Гидравлический метод контроля герметичности сварных соединений частично рассмотрен выше. Кроме того, к числу гидравлических испытаний относятся испытание наливом водой и испытание струей воды.

Испытание наливом водой применяют при контроле герметичности судовых конструкций, резервуаров для

хранения нефтепродуктов и т. п. До начала испытаний сварные швы тщательно обтирают ветошью или обдувают воздухом для получения сухой поверхности. Затем испытуемый объект заполняют водой, создавая за счет мерительных трубок дополнительное давление, величина которого устанавливается ТУ.

Продолжительность испытания определяется временем, необходимым для осмотра всех контролируемых швов после заполнения водой, и согласно ГОСТ 3242—54 должна быть не менее 1 часа.

Герметичность устанавливают по отсутствию в сварных соединениях течи, просачивания воды в виде капель и запотевания поверхности шва или околошовной зоны. Места с нарушенной герметичностью отмечают мелом, исправляют и подвергают повторному испытанию.

Испытание струей воды применяется в судостроительной промышленности при контроле сварных соединений, герметичность которых необходима в аварийных случаях (водонепроницаемые продольные и поперечные переборки, палубы, надстройки и т. п.). Это испытание производят струей воды из брандспойта с диаметром выходного отверстия не менее 15 *мм*. Давление воды в шланге должно быть не менее 1 *ати*, а расстояние наконечника брандспойта от испытуемой поверхности не более 2 *м*.

До начала испытания сторона шва, противоположная поливаемой и доступная для осмотра, тщательно обтирается ветошью или обдувается воздухом для получения сухой поверхности. В данном случае одновременно с поливом водой производится осмотр противоположной стороны шва.

Неплотность сварных швов и дефектные места обнаруживают по появлению течи, просачиванию воды в виде капель и запотеванию поверхности шва или околошовной зоны. Такие места отмечают мелом, исправляют и подвергают повторному испытанию.

Скорость продвижения струи вдоль шва 1 *м/мин*.

Все испытания герметичности водой должны проводиться при окружающей температуре воздуха не ниже 0° С, температуре воды не ниже +5° С и в сухую погоду, если испытания проводятся на открытой площадке (не под крышей).

Указанные обстоятельства, а также большая трудоемкость, громоздкость и ряд других существенных недостатков гидравлического метода определения герметичности свидетельствуют о его малой эффективности, вследствие чего этот метод вытесняется другими, более эффективными и производительными.

Проверка герметичности керосином

Керосин по сравнению с водой вследствие своей малой вязкости и небольшого поверхностного натяжения обладает большой способностью проникать через все мельчайшие неплотности без воздействия давления, а поэтому он применяется при контроле герметичности сварных соединений.

При этом способе для выявления пороков сварные соединения со стороны, доступной для осмотра, покрывают водным раствором мела или каолина и просушивают. С другой стороны сварное соединение при помощи кисти обильно смачивают керосином и сразу же ведут наблюдение за сварными соединениями. В местах залегания сквозных пороков на покрытой мелом или каолином поверхности сварного соединения выступают жирные точки, пятна, или линии, которые сразу же должны быть зафиксированы. С течением времени жирные пятна растекаются по большой площади, и точное определение места залегания пороков становится затруднительным.

Очень важным с точки зрения производительности контроля является вопрос времени выдержки изделия под керосином для выявления всех сквозных пороков, создающих неплотности. В различных литературных источниках рекомендуется разное время выдержки — от минут до часов. Это время устанавливают в зависимости от толщины свариваемого металла, пространственного положения шва, среды, которая будет находиться в данной емкости, окружающей температуры и т. п. Однако все эти рекомендации не подкрепляются никакими теоретическими и экспериментальными данными.

Теоретическими исследованиями и экспериментально [44] было установлено, что время проникания керосина через неплотности зависит прежде всего от окружающей температуры и размера неплотности. Например, при одних и тех же размерах неплотностей время проникания керосина при окружающей температуре —20° С возрастает (по сравнению с окружающей температурой +20° С) значительно; чем меньше размеры неплотности, тем больше требуется времени для проникания керосина. В работе показано также, что пространственное положение шва не оказывает влияния на время выдержки и при прочих равных условиях это время остается неизменным, независимо от того, какая поверхность смочена керосином — нижняя или верхняя. Практически также установлено, что при однократном обильном смачивании сварного соединения керосином время выдержки возрастает втрое по сравнению с трех-четырехкратным смачиванием. Следовательно, практически для сокращения времени выдержки под керосином необходимо применять многократное (3—4 раза) смачивание, в результате чего одного часа становится достаточно для выявления всех неплотностей.

Выявленные места залегания пороков вырубают, заваривают и вновь проверяют на герметичность.

Ценность описанного способа заключается в его простоте, доступности и надежности результатов. Недостатком является то, что наличие керосина в дефектном месте может в процессе заварки вызвать образование пор, во избежание чего следует тщательно удалять керосин после вырубки дефектного места.

Проверка герметичности гелиевым течеискателем

В последние годы появился новый способ определения герметичности с помощью гелиевых или галоидных течеискателей. Сущность этого способа заключается в том, что при использовании гелиевого течеискателя из испытуемого сосуда при помощи специального откачивающего агрегата удаляют воздух и создают вакуум. Затем снаружи сварные швы обдувают тонкой струей смеси воздуха с гелием. При наличии неплотностей гелий, благодаря его малой вязкости, проникает через сколь угодно малые неплотности внутрь испытуемого сосуда, а оттуда засасывается в вакуумную систему течеискателя с более высоким вакуумом, где и обнаруживается при помощи специальной аппаратуры и приборов.

В случае применения галлоидного течеискателя в испытуемом объекте создается избыточное давление и вводится небольшое количество газа, содержащего в своем составе фтор, хлор, бром или иод.

Чаще всего для этой цели используется фреон. Снаружи сосуда, возле сварных швов, воздух отсасывается. Если вводимый газ имеется в отсосанном воздухе, течеискатель подает звуковой сигнал и отклоняется стрелка индикатора, по величине отклонения которой можно судить о размерах неплотностей.

Чувствительность течеискателей исключительно высока. Любая утечка обнаруживается этими устройствами. Есть сведения о том, что этот способ настолько чувствителен, что с его помощью можно обнаружить неплотность, через которую 1 *см*^{3} гелия мог бы выйти лишь в течение 30 лет.

Проверка герметичности аммиаком

Этот способ предложен С. Т. Назаровым и заключается в том, что контролируемые сварные соединения покрывают бумажной лентой или бинтом, пропитанными 5-процентным водным раствором азотнокислой ртути. Испытуемый сосуд плотно закрывают заглушками и в него подают аммиак в количестве 1% от объема воздуха, заполняющего сосуд при нормальном давлении. Затем в сосуд нагнетают воздух до величины, устанавливаемой соответствующими техническими условиями. По истечении 3—5 мин. бумажную ленту или бинт снимают и отмечают дефектные места.

При наличии в сварных соединениях неплотностей аммиак проходит через них и вступает в реакцию с азотнокислой ртутью, оставляя на ленте темные пятна по которым и устанавливаются дефектные места.

Герметичность может быть обнаружена также путем заполнения объема сварного изделия смесью аммиака с воздухом под

избыточным давлением 10 *мм* вод. ст. и полива или пульверизации сварного соединения с внешней стороны суспензией следующего состава:

Фенолфталеин (порошок)	4 части по весу
Спирт (ректификат или сырец) . . .	40 частей по весу
Вода	до 100 частей по весу

Проницаемость шва и дефектные места определяют по изменению окраски суспензии, образующей при соединении с аммиаком красно-фиолетовые пятна.

Таблица 15

Количество обнаруженных неплотностей при различных методах контроля

№ днища	Метод химической реакции (аммиак + фенолфталеин)	Вакуумный метод
1	41	181
10	2	22
Итого . .	43	203

Применение этого способа на производстве при контроле непроницаемых сварных соединений днищ негабаритных резервуаров обнаружило ряд существенных недостатков и низкую эффективность его. В Институте электросварки имени Е. О. Патона были проведены сравнительные испытания сварных днищ на непроницаемость методом химической реакции и вакуумным методом (с применением вакуумной камеры).

Оказалось, что вакуумный метод (табл. 15) почти в пять раз эффективнее метода химической реакции при высокой производительности контроля.

15. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ КОНТРОЛЕ

Техника безопасности при пневматических испытаниях

Пневматический метод контроля замкнутых сосудов относится к числу таких, при проведении которых необходимо соблюдать особую осторожность. Процесс частичного разрушения при испытании мгновенно может развиться в полное разрушение со взрывом. В связи с этим для пневматических испытаний замкнутых сосудов, работающих под давлением и без давления, предусмотрен ряд ограничений, имеющих целью создание безопасных условий работы в процессе контроля. К числу этих ограничений относятся:

1) необходимость изолированного помещения для проведения испытаний или специальной площадки, огражденной со всех сторон железными листами;

2) наличие точных проверенных манометров для контроля за давлением, создаваемым в сосуде (манометров должно быть два — один рабочий, а другой контрольный);

3) необходимость специального бачка с предохранительными клапанами, отрегулированными на соответствующее давление, установленное на магистрали подачи сжатого воздуха;

4) категорическое запрещение производить обстукивание сварных швов, как это делается при гидравлическом испытании пробной нагрузкой.

Кроме того, необходимо вентиль на наполнительном трубопроводе от воздушной магистрали, а также манометры выносить за пределы помещения, в котором производится испытание, а людей на время испытания удалять в безопасное место.

Предельная величина испытательного давления на данный вид продукции устанавливается техническими условиями.

Испытуемый сосуд находится под предельным давлением в течение 5 мин., после чего давление снижается до рабочего и производится осмотр сосуда и проверка плотности его швов мыльным раствором.

Техника безопасности при рентгено- и гаммаграфировании

Работа по просвечиванию сварных швов и соединений рентгеновыми и гамма-лучами относится к числу вредных, а потому персонал, занятый на указанной работе, должен соблюдать соответствующие правила охраны труда и техники безопасности.

Необходимо помнить, что рентгеновы и гамма-лучи, проникшие в организм человека, вызывают в нем биологические изменения, сопровождающиеся видимыми наружными и скрытыми явлениями. К числу видимых проявлений действия лучей относятся ожоги с появлением труднозаживающих язв, волдырей, отеков и покраснения кожи, выпадение волос и др. Невидимые же проявления вызывают изменение состава крови, а при сильной степени поражения может возникнуть лучевая болезнь.

Кроме того, при просвечивании рентгеновыми лучами работающему персоналу приходится иметь дело с опасными для человека высокими напряжениями. И, наконец, ионизирующее действие рентгеновых и гамма-лучей вызывает насыщение воздуха озоном и окисными соединениями азота, отрицательно влияющими на организм человека, вызывая сильное утомление и головные боли.

Степень воздействия рентгеновых и гамма-лучей на организм человека зависит от времени, в течение которого организм подвергается облучению, расстояния, на котором находится человек от источника излучения, и интенсивности излучения.

Для защиты персонала, работающего на просвечивании сварных соединений, а также для уменьшения вредного действия рентгеновского и гамма-излучения предусматривается целый ряд мероприятий, создающих такие условия, при которых вредность действия сводится к минимуму.

К числу таких мероприятий относятся следующие.

1. Введение новых санитарных правил работы с радиоактивными веществами и источниками ионизирующих излучений, устанавливающих втрое меньшую предельно допустимую дозу облучения по сравнению с ранее действовавшими правилами.

Новыми правилами установлены три категории облучения.

Категория А. Профессиональное облучение лиц, работающих непосредственно с источниками ионизирующих излучений.

Категория Б. Облучение лиц, работающих в помещениях, смежных с помещениями, в которых ведутся работы с радиоактивными веществами и источниками ионизирующих излучений, но непосредственно не занятых работой с указанными веществами.

Категория В. Облучение населения.

При расчете предельно допустимой дозы (ПДД) внешнего и внутреннего облучения приняты следующие три группы критических органов.

I группа — все тело, гонады, хрусталик и кроветворные органы.

II группа — мышцы, жировая ткань, печень, почки, поджелудочная и предстательная железы, желудочно-кишечный тракт и легкие.

III группа — кожа, щитовидная железа, кости.

В зависимости от категории облучения и группы критических органов установлены следующие предельно допустимые дозы (табл. 16).

Допускается однократная доза внешнего облучения 3 *бэр* в любые 13 последовательных недель (квартал) при условии, что

Таблица 16

Предельно допустимые дозы внешнего и внутреннего облучения

Категория облучения	Внешнее облучение всего организма		Внутреннее облучение критических органов					
			I группа		II группа		III группа	
	мбэр/нед	*бэр/год*	*мбэр/нед*	*бэр/год*	*мбэр/нед*	*бэр/год*	*мбэр/нед*	*бэр/год*
А	100	5	100	5	300	15	600	30
Б	10	0,5	10	0,5	30	1,5	60	3
В	1	0,05	1	0,05	10	0,5	20	1

Примечание. Приведенные в таблице величины ПДД облучения не включают естественный фон. *бэр* (биологический эквивалент рентгена) — количество энергии любого вида излучения, поглощенного в биологической ткани, биологическое действие которой эквивалентно действию 1 *р* рентгеновых или гамма-лучей.

годовая доза не будет превышать 5 *бэр*. Общая суммарная доза *Д* для профессионального облучения не должна превышать

$$Д \leqslant 5(N-18)\ бэр,$$

где N — возраст человека;

18 лет — возраст начала профессионального облучения.

Суммарная доза к 30 годам при всех случаях не должна превышать 60 *бэр*.

Лица, которые облучались предельно допустимой дозой, установленной ранее действовавшими санитарными правилами и которые к моменту введения новых правил (к 1 января 1961 г.) накопили дозу бо́льшую, чем допускается выше приведенной формулой, не должны подвергаться облучению в дозах, превышающих 5 *бэр/год*, чтобы в последующий период суммарная доза не превосходила предела, устанавливаемого указанной формулой.

Однако при необходимости (выполнение аварийных работ и т. п.) для лиц в возрасте старше 30 лет суммарная годовая доза может быть увеличена до 12 *бэр*. Эта доза должна быть прибавлена к профессиональной дозе, накопленной к моменту повышенного облучения. Если полученная суммарная доза превышает максимум, определяемый формулой, то избыток компенсируется таким понижением последующего облучения, чтобы в течение периода, не превышающего 5 лет, накопленная доза совпадала с пределом, установленным формулой.

2. Организация дозиметрического контроля с тем, чтобы не допустить облучения персонала выш предельно допустимой дозы. С этой целью весь персонал, связанный с просвечиванием сварных соединений, снабжается индивидуальными дозиметрами типа ДК-02, ДК-50, КИД-1 и др., показания которых еженедельно заносятся в журнал.

Кроме того, должен вестись дозиметрический контроль в рабочем помещении с помощью специальных приборов с обязательной регистрацией данных в специальном журнале. К числу таких приборов относятся:

1) переносный микрорентгенометр типа ПМР-1, предназначенный для измерения мощности дозы гамма-излучения в диапазоне энергий от 0,2 до 2 *Мэв* в полевых и лабораторных условиях, микрорентгенометр типа МРМ-1 и др.;

2) дозиметрические сигнализаторы типа СД-1М или УСИД-12, предназначенные для контроля и сигнализации о превышении заданного уровня мощности дозы гамма-излучения в помещениях;

3) радиометры типа РМ-2 (карманный, малогабаритный) и др., предназначенные для обнаружения радиоактивных веществ, их качественного и количественного определения по гамма- и бета-излучениям.

3. Применение защитных устройств и удаление работающих на расстояние создают безопасные условия работы. В качестве защитных устройств применяют свинцовые

контейнеры для хранения, перевозки, переноски и работы при использовании радиоактивных препаратов, свинцовые защитные тубусы для рентгеновских трубок, свинцовые стекла для защиты при визуальном методе контроля.

Наряду с этим помещения, где производится работа по просвечиванию, должны иметь такую толщину стен и перегородок, которая поглощает энергию излучения настолько, что работа по другую сторону перегородки становится безопасной. В качестве материалов для стен и перегородок применяют барит-бетон, бетон, кирпич и др.

В связи с уменьшением предельно допустимой дозы облучения вопросы защиты персонала от вредного действия ионизирующих излучений ставятся по-новому, вследствие чего прежние нормы защиты для прочих равных условий оказались недействительными. Толщина защиты из свинца, железа, бетона, воды в зависимости от кратности ослабления и энергии гамма-излучения может быть определена по специальным таблицам, приведенным в новых санитарных правилах. Там же приведена таблица, пользуясь которой можно определить толщину защиты из различных материалов от гамма-лучей при дозе $Д = 0{,}1\ р$, шестидневной неделе и шестичасовом рабочем дне в зависимости от активности источника и расстояния от него.

4. Применение защитной спецодежды и дистанционного инструмента при работе с радиоактивными препаратами.

В качестве спецодежды применяются различные основные и дополнительные средства индивидуальной защиты в зависимости от класса выполняемой работы. Последнее регламентировано Приложением 9 новых санитарных правил и включает в себя комплекты одежды, начиная от нательного белья, халатов, комбинезонов, шапочек, ботинок, перчаток и т. д. и кончая спецодеждой из поливинилхлорида — шлемами, щитками и т. п.

Во избежание непосредственного прикосновения к радиоактивным препаратам руками (что приводит к тяжелым телесным повреждениям) необходимо пользоваться дистанционным инструментом в виде манипуляторов, механических захватов, щипцов, пинцетов и т. п. Применение такого инструмента способствует увеличению расстояния между работающим и препаратом и снижает дозу облучения пальцев рук в несколько тысяч раз.

Кроме того, во всех случаях для извлечения ампул из защитного контейнера с целью гаммаграфирования открытым способом следует применять автоматические устройства. Для этого используют специальные установки с часовым механизмом, автоматически выдвигающим препарат из контейнера на время экспозиции и автоматически убирающим его обратно по истечении времени экспозиции.

5. Защита от высокого напряжения при рентгенографировании должна быть надежной, так как прикосно-

вение к частям рентгеновского аппарата, находящимся под высоким напряжением, опасно для жизни. Наиболее опасным является прикосновение к обоим полюсам работающего аппарата. В связи с этим необходимо, чтобы все части рентгеновского аппарата и подводка высокого напряжения были бы недоступны для прикосновения при включенном высоком напряжении. Для этого применяют гибкий резиновый высоковольтный кабель, заземление наружной металлической оплетки этого кабеля, систему блокировки помещений, в которых имеется высокое напряжение, систему сигнализации в комнате пульта управления.

6. Обеспечение помещений для просвечивания хорошей вентиляцией с кратностью обмена воздуха не ниже пяти в час.

В процессе работы по просвечиванию рентгеновыми и гамма-лучами необходимо создавать безопасность не только на рабочем месте и не только для персонала, связанного с дефектоскопией сварной продукции, но и в смежных помещениях, где находятся люди, не имеющие отношение к дефектоскопии.

При просвечивании на открытых площадках внутри цеха должно предусматриваться ограждение опасных зон и вывешивание предупредительных надписей об опасности нахождения в данной зоне.

При использовании любого вида транспорта для перевозки радиоактивных препаратов должна быть обеспечена защита, создающая полную безопасность для пассажиров. С этой целью применяются специальные свинцовые контейнеры или для перевозки используется специальный транспорт.

За персоналом, работающим на просвечивании, ведется систематическое медицинское наблюдение, заключающееся в следующем:

1) лица, зачисляемые на работу по рентгено,- и гамма-дефектоскопии, подвергаются освидетельствованию для заключения о состоянии здоровья с обязательным анализом крови;

2) периодически, через каждые 6—12 месяцев, производится медицинский осмотр работающих с обязательным анализом крови;

3) при отклонении состояния здоровья от нормы работник, по заключению медицинской комиссии, отстраняется от работы по дефектоскопии и временно переводится на работу, не связанную с просвечиванием.

Вследствие вредности работы по просвечиванию для лиц, занятых на этой работе, установлены сокращенный рабочий день — шесть часов, более длительный отпуск и спецпитание.

Лица, работающие по просвечиванию, перед началом работы обязательно проходят санитарно-производственный инструктаж.

В заключение следует отметить, что правильная организация работы, проведение мероприятий, направленных на создание безопасных условий работы, соблюдение персоналом всех правил и норм техники безопасности позволяют полностью исключить вредное влияние рентгеновых и гамма-излучений на организм человека.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аснис А. Е., Меры повышения вибрационной прочности сварных конструкций (стенограмма лекции), ЛДНТП, 1956.

2. Бенуа Ф. Ф., Пороки сварных швов и наплавок, Речиздат, 1948.

3. Бендрышев О. Л., Влияние некоторых технологических и конструктивных факторов на прочность сварного соединения высокопрочной конструкционной стали, «Металловедение и обработка металлов», 1958, № 11.

4. Бондин И. Н., Вопросы организации контроля качества сварных конструкций, Сборник трудов НТО Машпром, кн. № 50, 1958.

5. Гохберг М. М., Влияние дефектов конструирования и изготовления сварных конструкций, работающих в условиях переменных напряжений, на их эксплуатационную прочность, Сборник трудов НТО Машпром, кн. № 50, 1958.

6. Громов М. А., Контроль качества сварных соединений электронно-оптическим преобразователем, «Сварочное производство», 1958, № 12.

7. Гурвич А. К., Методика и аппаратура для ультразвуковой дефектоскопии сварных швов стыковых и угловых соединений, Сборник трудов НТО Машпром, кн. № 50, 1958.

8. Гурвич А. К., Ультразвуковая дефектоскопия стыковых сварных швов, Информационно-технический листок № 63, ЛДНТП, 1956.

9. Гурвич А. К., Портативный ультразвуковой дефектоскоп УЗД-НИИМ-3, Трансжелдориздат, 1957.

10. Гурвич А. К., Кукли А. С., Ультразвуковой дефектоскоп УЗД-НИИМ-5, Трансжелдориздат, 1959.

11. Гурвич А. К., Перлис И. Л., Экспериментальное исследование дефектоскопии сварных угловых швов, Трансжелдориздат, 1956.

12. Гурвич А. К., Выявление внутренних пороков стыковых сварных швов методом ультразвуковой дефектоскопии, Трансжелдориздат, 1957.

13. Гурвич А. К., Ультразвуковая дефектоскопия сварных соединений (обзор), вып. I и II, ЛДНТП, 1960.

14. Губанова М. Р., Ультразвуковая дефектоскопия некоторых типов массивных швов, Ультразвуковые приборы ЦНИИТмаш, Машгиз, 1958.

15. Дефектоскопия металлов, Сб. статей под ред. Д. С. Шрайбера, Оборонгиз, 1959.

16. Еремин Н. И., Магнитная порошковая дефектоскопия, Машгиз, 1947.

17. Закандырин Б. Г., Вакуумный дефектоскоп для проверки сварных швов, «Транспортное строительство», 1958, № 9.

18. Коленда Б. Г., Электромагнитный метод контроля сварных швов, Судпромгиз, 1959.

19. Лев Е. С., Лопырев Н. К., Дефектоскопия в судостроении и судоремонте, Речной транспорт, 1957.

20. Лопатко И. Ф., Дианов С. В., Ультразвуковая дефектоскопия сварных швов аустенитной стали, Сборник докладов, кн. 50, НТО Машпром, 1956.

21. Маниев Б. Н., Бортникова А. А., Контроль качества контактно-стыковой сварки режущего инструмента, Методы контроля качества сварных, швов и конструкций (тезисы доклада), НТО Машпром, 1956.

22. Мельников Г. И., Гурвич А. К., Контроль качества контактной сварки ультразвуком, НТО Машпром, 1956.

23. Медовар Б. И., Сварка хромоникелевых аустенитных сталей, Машгиз, 1958.

24. Методика контроля качества сварных швов пролетных строений железнодорожных мостов гаммаграфированием, Сообщение № 18 НИИмостов, Трансжелдориздат, 1955.

25. Навроцкий Д. И., Маргацкий И. Ф., Сравнительная оценка вибрационной прочности сварных и клепаных соединений, Трансжелдориздат, 1957.
26. Назаров С. Т., Контроль качества сварных соединений, Машгиз, 1950.
27. Неелов Е. Н., Применение радиоактивных изотопов с мягким гамма-излучением для контроля качества сварных швов стали малых толщин, Методы контроля качества сварных швов и конструкций (Тезисы доклада), НТО Машпром, 1956.
28. Окерблом Н. О., Повышение долговечности сварных конструкций и увеличение производительности труда при их изготовлении, Труды ЛПИ, 1954, № 4.
29. Окерблом Н. О., Пути совершенствования сварных конструкций, Сборник трудов НТО Машпром, кн. № 48, Машгиз, 1958.
30. Перлис И. Л., О влиянии некоторых технологических дефектов в швах на прочность сварных соединений, Сборник трудов НТО Машпром, кн. № 48, Машгиз, 1958.
31. Перлис И. Л., Влияние технологических дефектов в стыковых швах на прочность соединения, Сборник трудов НТО Машпром, кн. № 50, 1958.
32. Петров В. А., Техника безопасности при гаммаграфии, Сборник трудов НТО Машпром, кн. № 50, 1958.
33. Погодин-Алексеев Г. И., Назаров С. Т., Гапченко М. Н., Методы испытаний сварных соединений и конструкций, Машгиз, 1952.
34. Правила устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов, Металлургиздат, 1959.
35. Правила устройства и безопасной эксплуатации трубопроводов пара и горячей воды, Углетехиздат, 1959.
36. Правила устройства и безопасной эксплуатации паровых котлов, Углетехиздат, 1958.
37. Правила устройства и безопасной эксплуатации сосудов, работающих под давлением, Углетехиздат, 1959.
38. Подгаецкий В. В., Контроль качества сварных соединений, Машгиз, 1957.
39. Румянцев С. В., Применение радиоактивных изотопов в дефектоскопии, Атомиздат, 1960.
40. Соколов В. С., Дефектоскопия материалов, Госэнергоиздат, 1957.
41. Суворов Л. М., Элементы рентгенодефектоскопии, Машгиз, 1957.
42. Трапезников А. К., Рентгенодефектоскопия, Машгиз, 1948.
43. Трапезников А. К., Контроль материалов и изделий рентгеновыми лучами, Машгиз, 1951.
44. Трущенко А. А., О проверке сварных изделий керосином, «Автоматическая сварка», 1954, № 5.
45. Фалькевич А. С., Прочность сварных цилиндрических резервуаров, Сборник трудов НТО Машпром, кн. № 48, Машгиз, 1958.
46. Фалькевич А. С., Кислюк Ф. И., Усенко Ю. В., Лубов В. М., Магнитографический метод контроля качества сварных соединений, «Сварочное производство», 1955, № 7.
47. Фалькевич А. С., Усенко Ю. В., Лубов В. М., Магнитографический контроль сварных соединений, Сборник трудов НТО Машпром, кн. № 50, 1958.
48. Химченко Н. В., Влияние некоторых факторов на чувствительность ультразвукового метода при контроле сварных швов, выполненных электрошлаковым способом, Сборник трудов НТО Машпром, кн. № 50, 1958.
49. ЦНИИТмаш, Ультразвуковые приборы ЦНИИТмаш, Машгиз, 1958.
50. Шеверницкий В. В., Жемчужников Г. В., К вопросу о влиянии трещин и непроваров в сварных швах на статическую прочность сварного соединения, «Автоматическая сварка», 1955, № 1.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Стр.

Введение . 3

Глава I. **Допустимые и недопустимые пороки в сварных конструкциях и причины, их вызывающие** 5

1. Внутренние пороки при сварке плавлением и их влияние на прочность сварных соединений —
2. Наружные пороки при сварке плавлением 14
3. Пороки при контактной сварке 19
4. Влияние конструктивных форм на прочность сварных конструкций . 21

Глава II. **Организация и методы контроля качества** 24

5. Вопросы организации технического контроля —
6. Методы контроля качества 27

Глава III. **Способы определения различных свойств металлов и сплавов** . 33

7. Определение механических свойств основного и наплавленного металла и сварных соединений —
8. Коррозионные и металлографические исследования . . . 52

Глава IV. **Методы контроля без разрушения сварных соединений** 60

9. Люминесцентный и цветной методы контроля —
10. Магнитная дефектоскопия сварных швов и соединений . . 64
11. Ультразвуковая дефектоскопия сварных швов и соединений 77
12. Контроль сварных соединений рентгеновыми и гамма-лучами 101

Глава V. **Определение прочности и герметичности сварных конструкций и соединений** 138

13. Методы определения качества сварных конструкций . . . —
14. Методы определения герметичности 146
15. Техника безопасности при контроле 152

Литература . 158

Иван Николаевич БОНДИН
КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ И КОНСТРУКЦИЙ
Редактор издательства *Г. Н. Курепина*

Технический редактор *Р. Г. Польская* Корректор *С. П. Смоленцева*

Сдано в производство 15/IX 1961 г. Подписано к печати 27/I 1962 г. М-02052.
Формат бумаги $60 \times 90^1/_{16}$. Печ. листов 10. Уч.-изд. листов 10,2. Тираж 8 000 экз.
Цена 61 коп. Заказ 832.

Типография «Красный Печатник», Ленинград, Московский проспект, 91.